Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

З КРЕДИТНОГО МОДУЛЮ
«ТЕХНОЛОГІЇ РАДІО- ТА ТЕЛЕВІЗІЙНОГО МОВЛЕННЯ»
ЧАСТИНА 1 «ТЕХНОЛОГІЇ РАДІОМОВЛЕННЯ»

для студентів спеціальностей:
172 «Телекомунікації та радіотехніка»
спеціалізації «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

Київ – 2021

«Технології радіо- та телевізійного мовлення». Частина 1 «Технології радіомовлення» [Текст]: Конспект лекцій для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» спеціалізації «Інженерія та програмування інфокомунікацій» / Уклад.: Г.Л.Авдєєнко, – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 404 с.

Навчальне видання

«ТЕХНОЛОГІЇ РАДІО- ТА ТЕЛЕВІЗІЙНОГО МОВЛЕННЯ» ЧАСТИНА 1 «ТЕХНОЛОГІЇ РАДІОМОВЛЕННЯ»

Конспект лекції

для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

спеціалізації «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

Укладач: Авдєєнко Г.Л.

Відповідальний редактор: .

Рецензенти:

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЇ РАДІОМОВЛЕННЯ……...3
***Лекція №1 Загальні відомості про мовлення*……..…..3**
1. Мета та завдання розділу дисципліни…….3
2. Види мовлення…….3
3. Поняття про канали і тракти мовлення……..8
4. Міжнародна стандартизація в області мовлення…….14
Питання для самоконтролю…..……16
ДОДАТОК А. Роздатний матеріал до Лекції №1……17
***Лекція №2 Слухова система людини та її властивості. Об`єктивні та психоакустичн і параметри звуковихсигналів*……19**
1. Будова слухової системи людини……...19
2. Види звукових коливань, що сприймаються слухом.....21
3. Об'єктивні параметри звуків.....23
3.1 Параметри звукового поля.....23
3.2 Статистичні характеристики звукових сигналів.....24
3.3 Спектральні характеристики й кореляційні властивості звукових сигналів.....29
4. Психоакустичні параметри звуків.....31
4.1. Висота тону як психоакустичний параметр.....31
4.2 Критичні смуги слуху.....33
4.3 Рівень гучності звуку.....35
4.4 Гучність звуку.....36
4.5 Тембр як психоакустичний параметр слуху.....38
5. Основні властивості слухової системи людини.....40
5.1. Пороги чутності й динамічний діапазон слуху.....40
5.2. Частотне маскування звуків.....44
5.3. Часові характеристики сприйняття звуку. Часове маскування звуку.....50
5.4. Нелінійність слуху.....53
5.5. Роздільна здатність слуху.....54
5.6 Бінауральні властивості слуху.....57
Питання для самоконтролю.....63
ДОДАТОК Б. Роздатний матеріал до Лекції №2……64
***Лекція №3. Радіобудинок*……67**
1. Загальна характеристика……67
2. Апаратно-студійний комплекс радіобудинку……..68

3. Реверберaційні процеси в приміщеннях……...73
4. Технологія формування програм звукового мовлення……79
5. Апаратно-студійний блок. Апаратні радіодому. Класифікація студій.....81
5.1 Апаратно-студійний блок……81
5.2 Апаратні радіодому……..86
5.3 Класифікація студій……..89
6. Сучасні телерадіоінформаційні комплекси…….93
Питання для самоконтролю……..108
ДОДАТОК В. Роздатний матеріал до Лекції №3……..109
***Лекція №4 Поняття про системи звукопередачі*……113**
1. Системи звукопередачі. Узагальнена структурна схема системи звукопередачі……113
2. Оцінка якості звучання……115
3. Звичайна монофонічна система……119
4. Звичайна стереофонічна система. Уявні джерела звуку…….121
5. Способи формування стереосигналів……..129
Питання для самоконтролю……..132
ДОДАТОК Г. Роздатний матеріал до Лекції №4……..133
***Лекція №5 Багатоканальні стереофонічні системи*……...136**
1. Багатоканальні стереофонічні системи……..136
1.1 Загальні відомості……136
1.2 Повна квадрофонія……..137
1.3 Стереоамбіфонічні системи……141
1.4 Системи псевдо-або квазістереофонії……...143
2. Сучасні системи просторового звучання……143
3. Стереофонія в кінематографі.....147
4. Універсальний формат формування, передачі і відтворення звукових сигналів……...150
Питання для самоконтролю……..154
ДОДАТОК Д. Роздатний матеріал до Лекції №5……155
***Лекція №6 Якість каналів і трактів звукового мовлення*……...158**
1. Оцінка якості каналів та трактів звукового мовлення. Класи якості обладнання……158
1.1 Оцінка каналів і трактів звукового мовлення……158
1.2 Класи якості обладнання……..160
2. Спотворення мовних сигналів у ланках мовних трактів та їх нормування……161
2.1 Частотні спотворення……162
2.2 Фазові спотворення……163
2.3 Нелінійні спотворення……164

2.4 Шуми та завади……164
2.5 Інші норми на параметри мовних каналів……167
3. Автоматизований контроль і управління в мережі звукового мовлення…….....169
Питання для самоконтролю……..173
ДОДАТОК Е. Роздатний матеріал до Лекції №6……..…175
***Лекція №7 Тракт первинного розподілу програм мовлення*……177**
1. Структура тракту первинного розподілу програм мовлення.....177
1.1 Структура тракту……177
1.2 З'єднувальні лінії……179
2. Організація міжміських каналів звукового мовлення……182
2.1 Аналогові міжміські канали звукового мовлення……...182
2.2 Канали звукового мовлення в цифрових системах передачі….184
3. Передача сигналів звукового мовлення по радіорелейних лініях.....186
4. Передача сигналів звукового мовлення по супутникових лініях…..187
Питання для самоконтролю……..194
ДОДАТОК Є. Роздатний матеріал до Лекції №7……..195
***Лекція №8 Тракт вторинного розподілу програм мовлення з використанням радіомовних мереж*……197**
1. Смуги частот, що відведені для радіомовлення……197
2. Особливості розповсюдження радіохвиль в діапазонах частот наземного радіомовлення…….199
3. Загальні відомості про планування мережі мовних радіостанцій.....204
3.1 Загальні відомості про побудову передавальної мережі радіомовлення……204
3.2 Побудова передавальної мережі радіомовлення кілометрового та гектометрового діапазонів хвиль……...212
3.3 Побудова передавальної мережі радіомовлення метрового діапазону хвиль……214
Питання для самоконтролю…….....218
ДОДАТОК Є. Роздатний матеріал до Лекції №8……..219
***Лекція №9 Аналогове синхронне радіомовлення*……...221**
1. Синхронне радіомовлення…….....229
2. Системи стереофонічного радіомовлення в діапазоні гектометрових хвиль……....235
3. Особливості побудови мовних радіопередавачів із амплитудною модуляцією……240
4. Особливості радіомовних передавачів із кутовою модуляцією……243
Питання для самоконтролю……..244
ДОДАТОК З. Роздатний матеріал до Лекції №9……..245

Лекція №10 Системи стереофонічного радіомовлення в діапазоні метрових хвиль……..247
1. Особливості систем стереофонічного радіомовлення в діапазоні метрових хвиль……..247
2. Система стереофонічного мовлення з полярною модуляцією……247
3. Система стереомовлення з пілот – сигналом……253
4. Система стереомовлення з ЧМ-ЧМ……253
5. Реалізація вимог до каналу радіомовлення……..……255
6.Інтеграція звукового мовлення і мовних даних. Система RDS……..262
Питання для самоконтролю……..267
ДОДАТОК І. Роздатний матеріал до Лекції №10……268
Лекція №11 Цифрове подання звукових мовних сигналів…….....270
1. Аналогово-цифрове перетворювання звукових сигналів……..270
2. Дискретизація. Квантування. Кодування……271
2.1 Дискретизація……....271
2.2 Квантування……...273
2.3 Кодування……...275
3. Шуми квантування……276
4. Рівномірне квантування. Нерівномірне квантування……....281
5. Миттєве компандування. Майже миттєве компандування……...284
5.1 Миттєве компандування……..284
5.2 Майже миттєве компандування……288
6. Передспотворення при цифровій передачі мовних сигналів…….291
Питання для самоконтролю……...292
ДОДАТОК Й. Роздатний матеріал до Лекції №11……293
Лекція №12 Скорочення надлишковості мовних сигналів……...295
1. Методи кодування джерел мовних сигналів……295
2. Скорочення статистичної надлишковості……..297
3. Скорочення психофізіологічної надлишковості……...297
4. Стандарт стиснення мовних сигналів MPEG-1……305
5. Стандарт стиснення мовних сигналів MPEG-2……323
6. Стандарт стиснення мовних сигналів MPEG-2 AAC……...329
7. Стандарт стиснення мовних сигналів MPEG-4……...331
8. Боротьба з помилками в цифрових системах передачі. Передискретизація……....333
8.1 Боротьба з помилками в цифрових системах передачі……..333
8.2 Передискретизація……....340
Питання для самоконтролю…….....342
ДОДАТОК И. Роздатний матеріал до Лекції №12……343
Лекція №13 Основи цифрового радіомовлення……..343
1. Різновидності цифрових систем ефірного радіомовлення……...351
1.1 Загальні відомості……...351

1.2 Різновиди цифрових систем ефірного радіомовлення…….352
2. Тракти формування та приймання сигналів цифрового радіомовлення……355
3. Формування сигналів передачі радіомовлення за технологією COFDM……357
Питання для самоконтролю…….…….365
ДОДАТОК Ї. Роздатний матеріал до Лекції №13…….366
***Лекція №14 Цифрове радіомовлення стандарту T-DAB*……..……368**
1. Перспективна система цифрового радіомовлення T-DAB……..368
1.1 Загальна характеристика……...368
1.2 Організація цифрових потоків…….371
1.3 Режими передачі……...374
2. COFDM в стандарті DAB……...376
3. Особливості побудови мереж цифрового радіомовлення……378
3.1 Порівняння із системами аналогового радіомовлення…….378
3.2 Параметри систем радіомовлення, необхідні для проектування та планування цифрової мережі радіомовлення…….378
3.3 Особливості планування мереж цифрового радіомовлення…...380
Питання для самоконтролю…….…….385
ДОДАТОК К. Роздатний матеріал до Лекції №14……..……386
***Лекція №15 Цифрове радіомовлення по технологіям DRM та DRM+*……..388**
1. Загальні характеристики технології DRM…….388
2. Передавальна частина технології DRM……..389
3. Режими передачі……..391
4. Кодування первинних цифрових мовних сигналів в системі DRM. Концепція SBR……396
5. Радіоприймач системи DRM……398
6. Система радіомовлення DRM+……....399
Питання для самоконтролю…….…….401
ДОДАТОК Л. Роздатний матеріал до Лекції №15……..……402

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЇ РАДІОМОВЛЕННЯ

ЛЕКЦІЯ №1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО МОВЛЕННЯ

ЛІТЕРАТУРА:

1. Брагин А.С. Технологии вещательных служб. Часть 1. Технологии звукового радиовещания. –К.: НТУУ «КПИ», 2006.
2. Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов./Под ред. Ю. А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком., Радио и связь, 2007. – 872 с.

РОЗДАТНИЙ МАТЕРІАЛ: див. ДОДАТОК А

1. Мета та завдання розділу дисципліни

Мета: *отримання базових знань о системах радіомовлення, необхідних спеціалістам в галузі телекомунікацій*

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**:
1) вивчити об’єктивні та психоакустичні параметри звукових сигналів мовлення, а також їхнє сприйняття органами слуху людини;
2) отримати уявлення про сучасні системи звукопередачі;
3) вивчити тракти формування програм мовлення;
4) вивчити тракти первинного та вторинного формування програм мовлення з використанням радіомовних мереж;
5) вивчити методи оцінки якості каналів та трактів звукового мовлення;
6) отримати уявлення про способи цифрового перетворення звукових мовних сигналів й методах скорочення їх інформаційної надлишковості;
7) вивчити основи та перспективи впровадження технологій цифрового радіомовлення.

2. Види мовлення

Під **мовленням** розуміють організацію і поширення за допомогою систем, мереж і засобів електричного зв'язку різних повідомлень, призначених широкому колу територіально розосереджених абонентів (слухачів і телеглядачів), тобто всьому **населенню**, і служить цілям їх інформування, ідеологічного впливу (пропаганди), освіти, культурного виховання та розумного відпочинку.

У загальноприйнятому розумінні мовлення є однією із складових частин засобів масової інформації (ЗМІ), що включають радіо-і проводове мовлення, телебачення та друковану продукцію.Вони є дієвими засобами впливу на розум і почуття людей. У наш час ЗМІ, в тому числі й електронні, в силу їх специфічно важливої ролі в суспільстві образно називають «четвертою владою».

Системи мовлення прийнято називати електронними ЗМІ(рис.1.1).Друга складова частина ЗМІ включає друковану продукцію.

Рис.1.1. Місце мовлення в системі засобів масової інформації

У мовленні можна виділити дві грані –*художню* (творчу) і *технічну*. **Художня складова** – це формування і виконання змісту програм (у тому числі з використанням технічних засобів, наприклад, комп'ютерної анімації тощо), а **технічна** – формування та перетворення електричних сигналів, що відображають зміст програм мовлення, і доведення цих сигналів до споживачів. Тому визначення мовлення, як *підгалузі* зв'язку ***відображає тільки технічну сторону***, а творчі питання формування програм та перетворення електричних сигналів у студіях з метою вирішення художніх завдань не потрапили до визначення.

Викладене нижче відноситься переважно до технічної сторони звукового мовлення.

Мовлення принципово відрізняється від традиційного електрозв'язку тим, що сприяє цілям формування та передачі художньої (естетичної) інформації, а не тільки смислової (семантичної). Ця принципова відмінність пред'являє інші технічні вимоги до якості первинних електричних сигналів мовлення, каналів і трактів мовлення (на відміну від трактів передачі в електрозв'язку).

Терміни та їх визначення для звукового мовлення наведені у **ДСТУ 3785-98.**

Особливими функціями *мовлення в широкому сенсі* є озвучування великих відкритих просторів і приміщень, звукопідсилення для великих

аудиторій публіки, одночасний (синхронний) переклад мови на конференціях і зборах з багатонаціональним складом учасників, передача повідомлень служби цивільної оборони (надзвичайних ситуацій). До служб мовлення можуть бути також віднесені служби відео за замовленням, телебачення в будь-який час, поширення аудіовізуальної інформації на магнітних та оптичних носіях.

***За видом повідомлень**, що передаються*, до Всесвітньої Асамблеї радіозв'язку (ВАКР-2000, м. Стамбул) у мовленні традиційно розрізняли звукове та телевізійне мовлення. ВАКР-2000 відобразила перспективи подальшого розвитку телерадіомовлення, рис. 1.2.

За формою електричних сигналів мовлення класифікується на аналогове і цифрове.

Звукове мовлення призначене *для слухачів*. Потреба населення в послугах звукового мовлення залишається досить високою.

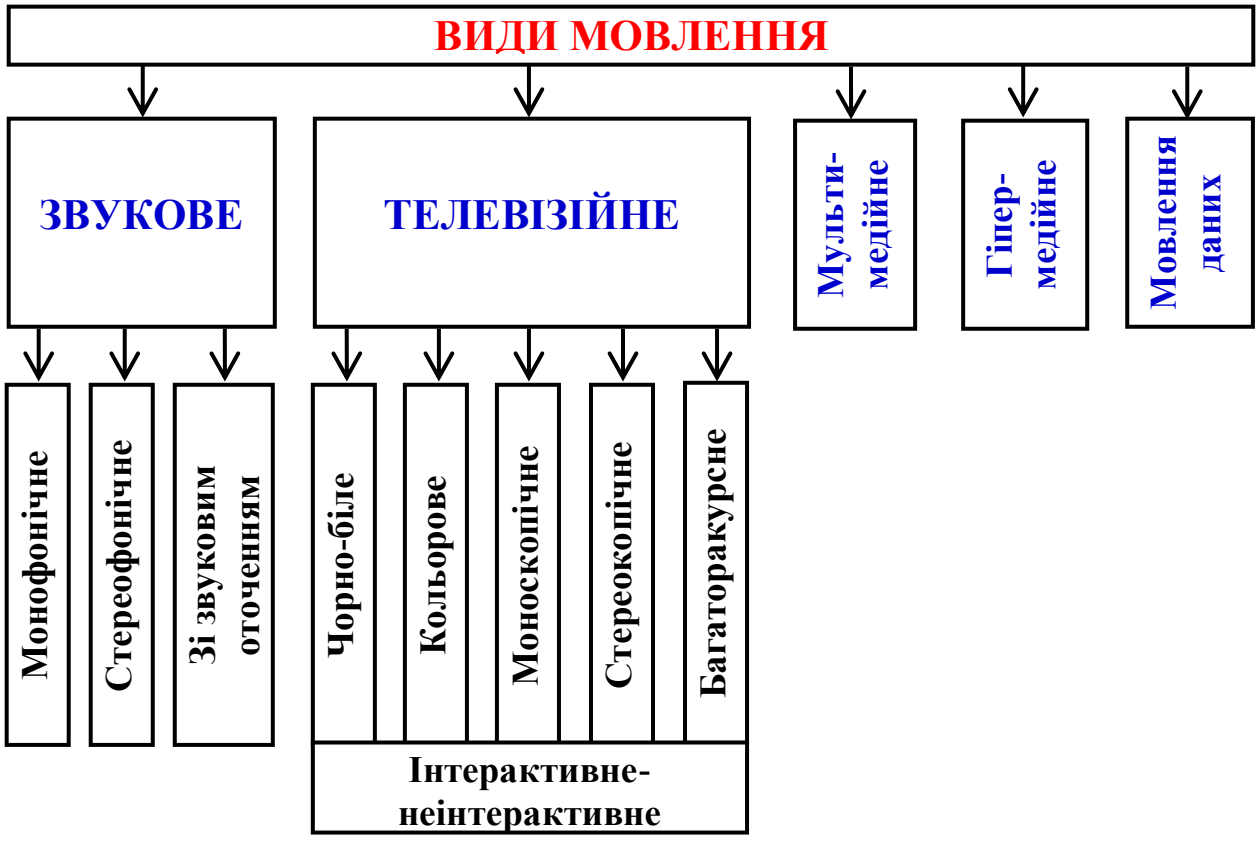


Рис.1.2. Сучасна класифікація видів мовлення

Звукове мовлення в свою чергу класифікується на **монофонічне**, **стереофонічне** і **більш високого рівня (зі звуковим оточенням)**. Відповідно звук передається слухачеві по одному каналу мовлення, по двох каналах мовлення (лівий і правий) або по шістьох каналах (лівий, центральний, правий, лівий звукового оточення, правий звукового оточення, канал поліпшення відтворення низьких частот).

Крім того, звукове мовлення може бути **одно**-або **багатомовним**. В останньому випадку потрібне для передачі число каналів зростає пропорційно до кількості мов.

Кожен з перелічених видів мовлення може бути з **відеосупроводом** (у перспективі) або без нього.

Телевізійне мовлення є окремим випадком аудіовізуальних додатків (до інших додатків можна віднести, наприклад, промислове телебачення, спеціалізовані системи розпізнавання образів та ін.) Його основне призначення полягає в передачі відеосцен (зазвичай – зі звуковим супроводом). За видом зображення, що передається, ТБ класифікується на **чорно-біле і кольорове.**

Кожне із зображень може бути **моноскопічним** (плоске) і **стереоскопічним** (об'ємне), а також **багаторакурсне.** В свою чергу будь-який з перерахованих видів ТБ може бути: **з монофонічним звуковим супроводом, зі стереофонічним звуковим супроводом або зі звуковим оточенням**. І, нарешті, будь-який вид телевізійного мовлення може бути **інтерактивним** і **неінтерактивним.**

Інтерактивне ТБ – це телебачення з можливістю одностороннього зворотного або двостороннього зв'язку глядача по додатковому каналу (або каналах) з джерелом телевізійних програм. Він використовується для керування доступом до джерела мовної інформації і, як правило, не вимагає такої ж пропускної здатності, як прямий канал розподілу мовної інформації.

Подальшим **продовженням звукового та телевізійного мовлення є мультимедійне мовлення**. При формуваннімультимедійного сигналу мовлення можуть використовуватися комп'ютерні технології, причому аудіовізуальні сцени поєднуються з натурними відео-і аудіосценами, відео у графічному і векторному форматах, з текстовою інформацією та синтетичним звуком.

Наступним **розвитком мультимедійного мовлення є гіпермедійне мовлення**. У ньому, на додаток до мультимедійного, використовуються гіперпосилання, що дозволяють створювати аудіовізуальні сцени за ієрархічним принципом. Різним рівням ієрархії сцени відповідають різні рівні деталізації.

Інформація в службі **«мовлення даних» розподіляється від джерела для масового розподілу**. До мовлення даних відносяться: *система Телетекст, системи мовлення комп'ютерних програм, інформаційні служби типу «газета - всім»* і т.д.

Зі згаданих трьох попередніх видів мовлення поки що найбільш «популярною» є мовлення даних через систему Телетекст.

Перспективні мультимедійне і гіпермедійне мовлення знаходяться в стадії стандартизації в контексті еволюційної інтеграції інформаційно-телекомунікаційних мереж.

Найближчим часом слід очікувати появи засобів зберігання і обробки інформації, що використовують принципи об'ємної голографії, яка також знайде застосування в технологіях мовлення.

Кожен із згаданих видів мовлення може використовувати для розподілу мовних повідомлень до користувачів середовище зі штучних направляючих ліній (наприклад, *проводове мовлення, кабельне телебачення*), відкритеприродне середовище (наприклад, *традиційне наземне радіомовлення,*

розподілу програм за допомогою систем в міліметровому діапазоні частот, супутникове мовлення) або їх комбінацію, рис.1.3.

Організацією мовлення займаються **державні та приватні телерадіомовні компанії (ТРК).** В Україні державною ТРК є **НРУ (*Національне Радіо України***). У підпорядкуванні цих компаній перебувають питання підготовки і формування програм мовлення, визначення добового обсягу мовлення, послідовності передач у часі (розклад), вибору (оренди або закупівлі) технічних засобів для розподілу та передачі сформованих програм слухачам (телеглядачам).

Повідомлення, що підлягають поширенню для населення, компонуються в тематично однорідні, закінчені частини або блоки,які **називаються передачами**, і випускаються відповідно до розкладу.

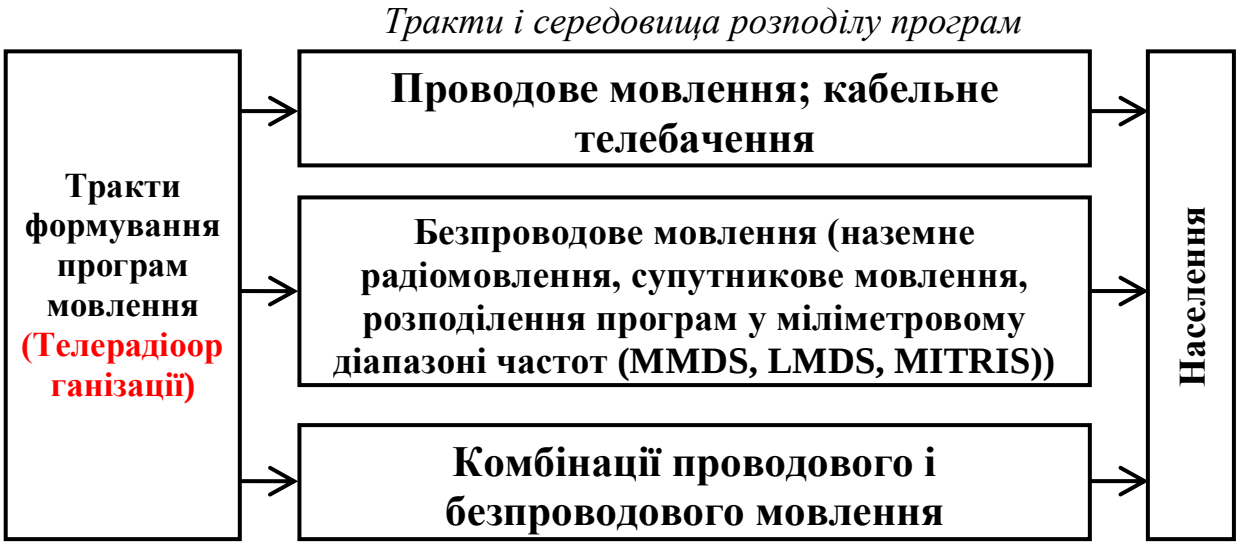


Рис.1.3. Середовище розподілу програм мовлення

Різні види передач (новини, репортажі, концерти, спектаклі та інші) об'єднуються в послідовність, яка називається програмою мовлення. Відомі, наприклад, програми для дітей та юнацтва, для ділових людей, музичні, навчально-освітні, театральні, розважальні і т.д.

Процес організації та розподілу програм мовлення відображає рис.1.4.

Передачі програм ведуться безпосередньо в **прямій трансляції** або в **запису**. Їх співвідношення визначається прийнятою концепцією.

Загальну структуру організації, що здійснює мовлення, ілюструє рис.1.5. Програми мовлення готуються в **редакціях, телевізійних агенціях, творчих об'єднаннях ТРК**, спеціалізованих зажанрами (наприклад, в редакціях музичного мовлення, спортивного, тощо). У редакціях визначається тематика передач, підбираютьсяматеріали, автори, виконавці, ведеться режисерська та репетиційнаробота.

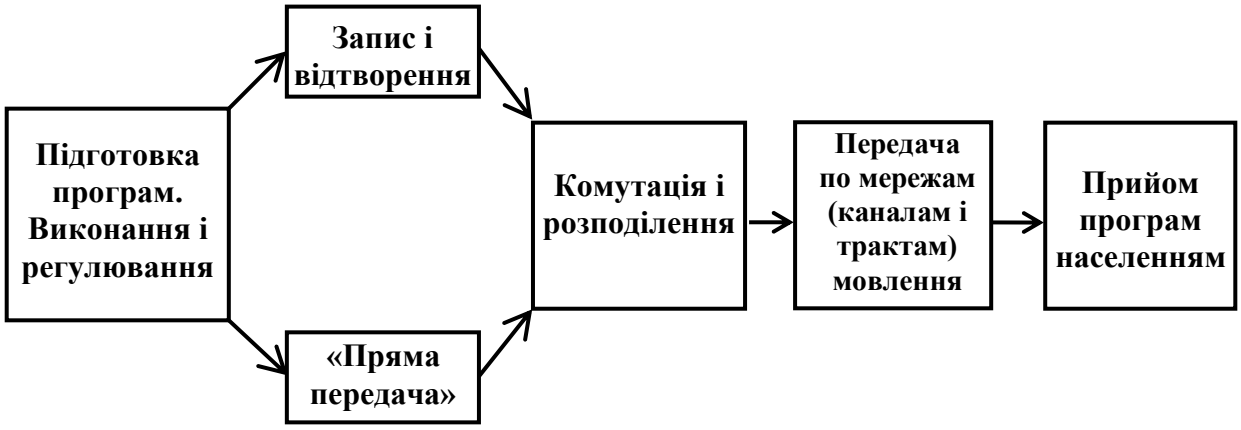


Рис.1.4. Процес організації та розподілу програм мовлення

Рис.1.5. Структура організації , що здійснює мовлення

Координаційні органи займаються стратегією мовлення, добовими, тижневими, місячними планами, взаємодією різних програм. **Відділ випуску** складає розклад передач і реалізує його. **Відділ технічного контролю** стежить за змістом технічною якістю мовлення.

На додаток до загальнонаціональних програм формуються програми місцевого мовлення (в областях, містах). Отримують поширення і комерційні телерадіомовлення.

3. Поняття про канали і тракти мовлення

Шлях, по якому електричні сигнали мовлення проходять від джерел цих сигналів (мікрофони, магнітофони, програвачі компакт-дисків, пристрої відтворення оптичної фонограми, електронного музичного інструменту і т.д.) до відтворюючих приймальних пристроїв, називають ***електричним каналом мовлення***. Окремі функціонально завершені і організаційно відокремлені частини електричного каналу називаються ***трактами***, а більш дрібні членування –***ланками трактів***.

Сигнали мовлення передаються населенню за допомогою **безпроводових** (*радіомовлення, супутникове мовлення*) або **проводових** (*проводове мовлення*) засобів.

Відповідно до ГОСТ 11515-91 електричний канал мовлення (на відміну від зв'язкового каналу) ***закінчується*** антеною мовного (телевізійного)

радіопередавача чи абонентською розеткою (при проводовому мовленні). В абсолютній більшості канали мовлення – односторонні, тобто від джерела мовної інформації до її споживача. Винятком є *інтерактивний режим* мовлення.

У самому загальному вигляді склад каналу радіомовлення (і проводового мовлення) може бути представлений у вигляді трьох трактів, рис.1.6.

Тракт формування програм (ТФП) включає в себе обладнання студій і апаратних радіобудинків, телевізійних центрів, що служить для формування, перетворення і підсилення електричних сигналів мовлення.

Тракт первинного розподілу містить міські з'єднувальні лінії та міжміські канали мовлення, а ***тракт вторинного розподілу*** – обладнання радіомовних передавальних центрів (мережа мовних радіопередавачів) і станцій проводового мовлення (підсилювачі, передавачі проводового мовлення), а також лінії проводового мовлення.

У майбутньому, крім традиційного первинного розподілу мовної інформації до вузлів локального розподілу мовної інформації та вторинного її розподілу на приймачі користувачів, може виникнути потреба в мережах (трактах) для інтерактивного обміну програмними матеріалами між студіями, забезпечення збору матеріалів (електронного збору новин ENG, супутникового збору новин SNG і т.д.).

Тракти прийому програм утворюються багатим асортиментом радіомовних і телевізійних приймачів та абонентських пристроїв проводового мовлення. Типовими представниками останніх є **трьохпрограмні приймачі звукового мовлення** або звичайний **гучномовець** у квартирі, в службовому приміщенні. Більшість цих пристроїв мають більш низькі параметри якості, ніж професійні пристрої, що утворюють канал мовлення (рис.1.6).

Як і в звичайних телекомунікаціях, у мовленні використовується термін **«система»**. Найчастіше під цим терміном розуміється сукупність технічних рішень та пристроїв для організації трактів і каналів мовлення. Наприклад, говорять про систему звукового мовлення в цілому, про системи радіомовлення та проводового мовлення, системи радіомовлення конкретного діапазону хвиль (кілометрових, гектометрових, декаметрових і метрових хвиль), про системи радіомовлення з амплітудною (частотною чи іншою) модуляцією, про системи цифрового радіомовлення та телебачення і т.д. Таким терміном виділяється окрема характеристика (властивість) згаданої сукупності.

Вище згадано термін **«мережа»**. Під **мережею** розуміється розподіл на території, що обслуговується,вибраних технічних засобів мовлення. Наприклад, говорять про мережу міжміських каналів звукового мовлення, мережі радіомовних станцій, централізованої або децентралізованої мережі проводового (або радіо-) мовлення. Територію може обслуговувати одна станція мовлення або група станцій. Зазвичай загальнодержавна мережа мовлення організується на первинній мережі країни, а також мережі радіопередавальних станцій та мережі проводового мовлення.

Якщо в телекомунікаційних мережах використовується термінологія ***канали (тракти) передачі***, то в мережах мовлення – ***канали мовлення*** *та тракти розподілу програм*.

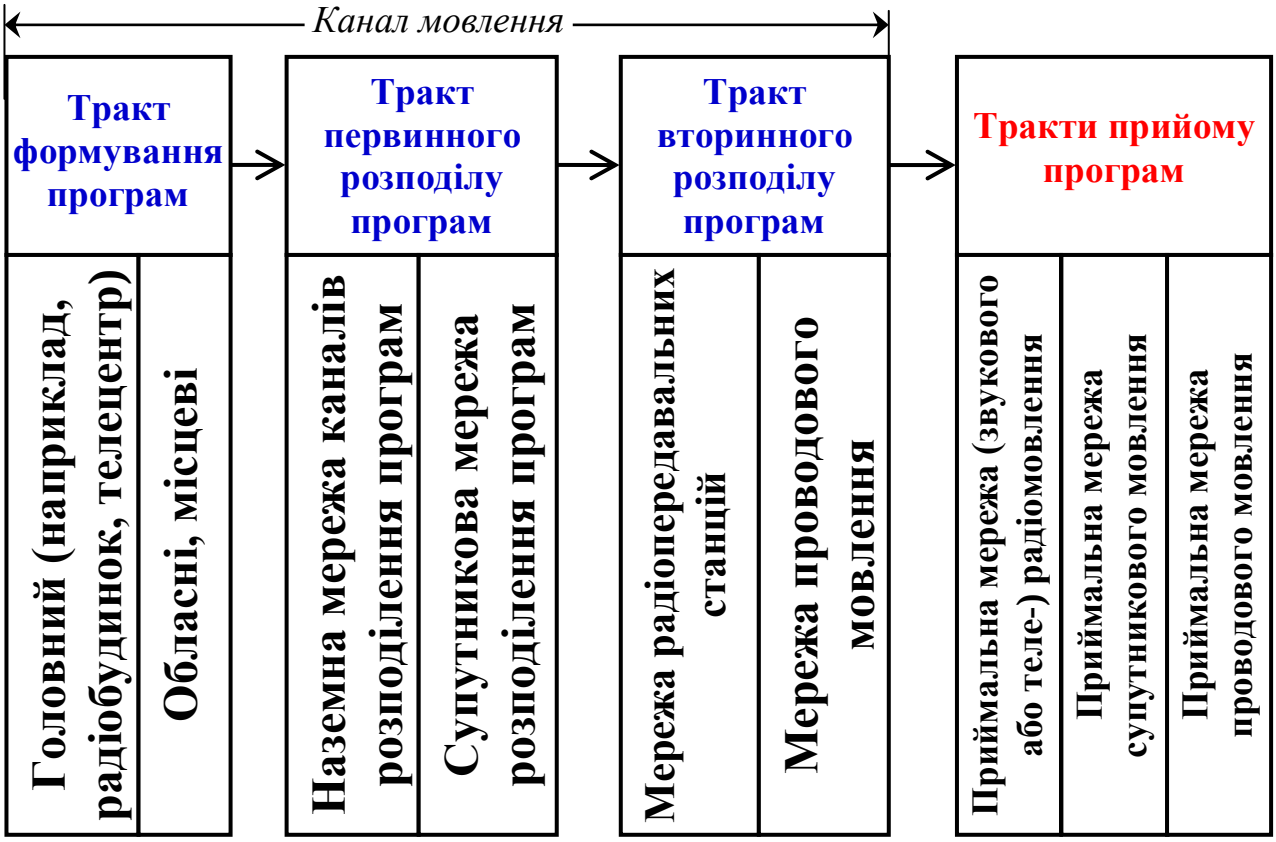


Рис. 1.6. Загальна структура каналу мовлення

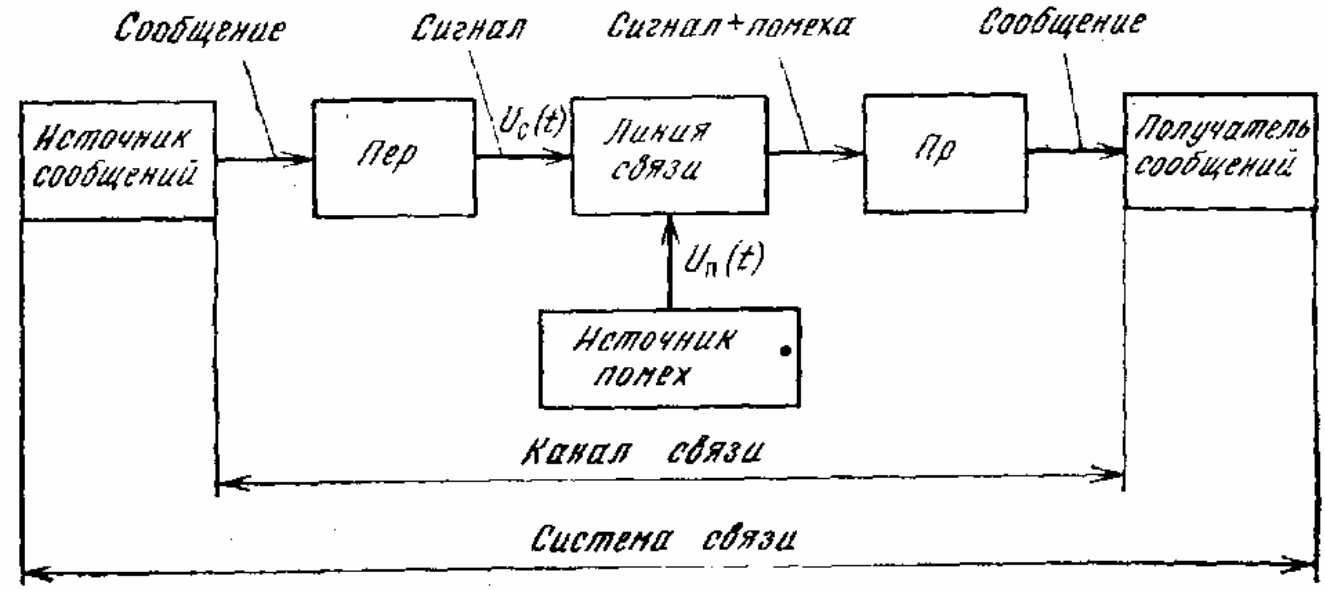


Рис. В.1. Обобщенная схема канала связи

На рис.В.1 зображено узагальнену схему каналу зв’язку.

Інтеграція телерадіомовлення в первинну мережу країни спрощено представлена на рис.1.7.

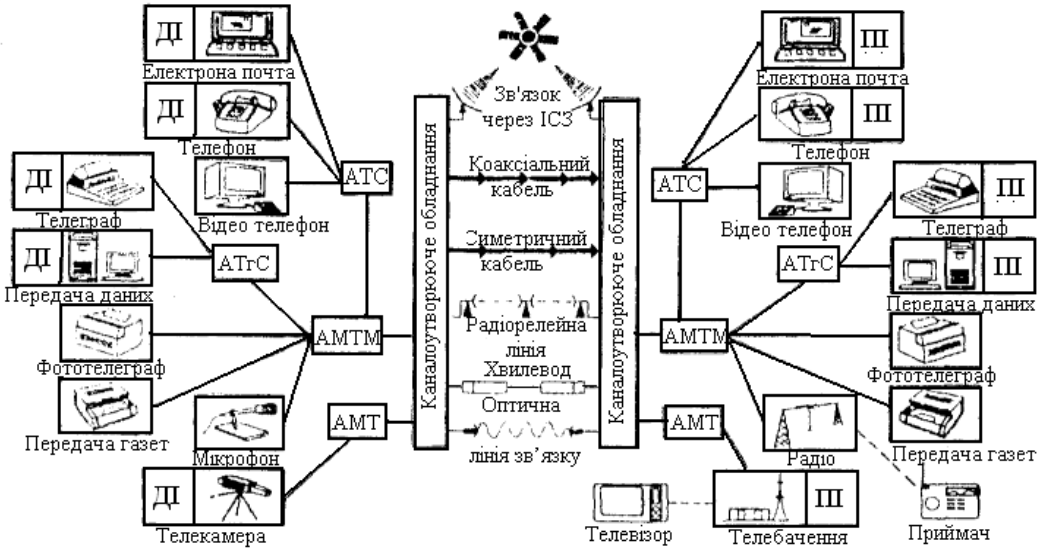
Дамо коротку характеристику трактів.

Тракт формування програм може бути **головним** (зазвичай розташовується в столиці країни) і **місцевим** (в обласних, районних і міських центрах).

У цьому тракті здійснюються процеси підготовки і випуску програм мовлення, їх тиражування, комутація на з'єднувальні лінії до засобів розподілу програм, контроль якості, забезпечення надійності функціонування всього комплексу обладнання. Технічні засоби тракту входять до складу **радіобудинків**.

Структура головного центру тракту формування програм і тракту первинного розподілу програм мовлення представлена на рис.1.8.

Апаратно-студійні комплекси (АСК) радіобудинків (телерадіомовних центрів) містять **апаратно-студійні блоки**(АСБ), в кожному з яких є студія і одна-дві апаратних(наприклад, записуй мовлення), монтажна (МА), трансляційна (ТА) і центральна апаратні (ЦА). Їх функціонування викладається нижче.



Тут: АТС – *автоматична телефонна станція*; АТгС – *автоматична телеграфна станція*; АМТМ – *апаратна міжміська телефонна мережа*; АМТ – *апаратна міжміського телебачення*; ДІ – *джерела інформації*; ПІ – *приймачі інформації*.

Рис.1.7. Інтеграція служб мовлення в телекомунікаційні мережі

Тракт первинного розподілу програм головного центру програм мовлення включає міські з'єднувальні лінії, міжміські канали мовлення, а також відповідні апаратні – **комутаційно-розподільчу** і **міжміську мовлення**, а також системи оперативно-технічного управління та обслуговування (наземних кабельних і радіорелейних, супутникових), що організовані в системах передачі первинної мережі.

Рис.1.8. Головний центр тракту формування програм і тракт первинного розподілу програм мовлення

У ***комутаційно-розподільчій апаратній*** здійснюється прийом і контроль сигналів програм, що надходять від апаратно-студійних комплексів телерадіокомпаній, і передача їх далі до радіопередавальної станції мовлення столиці, в ***Центральну міжміську апаратну мовлення*** і ***Центральну станцію проводового мовлення***.

У Центральній міжміській апаратній мовлення забезпечується управління міжміськими каналами мовлення та їх контроль.

Окремим випадком міжміської апаратної мовлення може виступати ***регіональна вузлова магістральна апаратна мовлення***, «прив'язана» до мережевого вузла первинної (транспортної) мережі міжміського зв'язку. Міжміська апаратна мовлення розташовується на кінцевій міжміській станції первинної мережі обласного центру.

Після Центральної міжміської апаратної мовлення сигнали програм надходять в ***магістральні канали розподілу сигналів програм***. Згадані канали зазвичай «вписуються» в стаціонарну первинну (транспортну) мережу, складовими частинами якої виступають супутникові, кабельні та радіорелейні системи передачі, обладнання міжміських телефонних станцій.

Таким чином, ***мережа розподілу програм звукового мовлення може повторювати радіально-зонову структуру магістральної, внутрішньо-зонової та місцевої телекомунікаційної мережі.*** Обласні (зонові) центри мовлення розподіляють сигнали мовлення зазвичай за радіальним принципом. Вони мають більш просту структуру.

Спрощений варіант структури обласного центру мовлення представлений на рис.1.9.

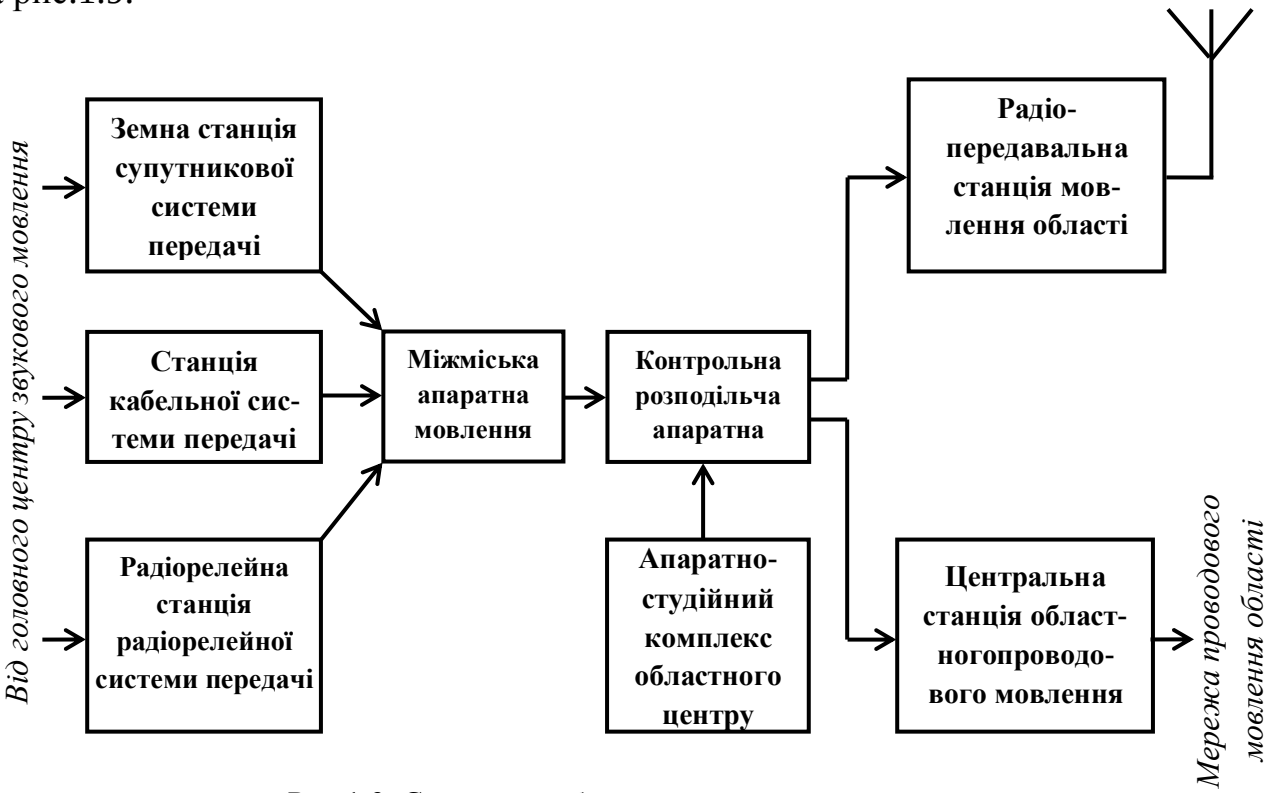


Рис.1.9. Структура обласного центру мовлення

Від міжміської та контрольно-розподільчої апаратних мовлення (а також від апаратно-студійного комплексу обласних центрів) сигнали програм поступають до **районних центрів** кожної області (на станції радіо- і проводового мовлення).

По місцевій мережі програми мовлення розподіляються від обласних центрів до сільських станцій проводового мовлення.

Місцеві районні центри звукового мовлення (рис.1.10) містять пульт районного мовлення, розташований на станції проводового мовлення, підсилювальні та передавальні пристрої, мережу проводового мовлення.

Рис.1.10. Структура місцевого центру звукового мовлення

Знаходить застосування і місцеве радіомовлення (зокрема, приватні радіомовні станції інформаційно-розважального характеру), а також місцеве TV.

Викладені принципи організації розподілу програм мовлення характерні при використанні наземних систем передачі − кабельних і радіорелейних. Можлива організація «наскрізних» каналів розподілу програм мовлення від

головного центру до місцевих радіопередавальних станцій мовлення і до станцій проводового мовлення за допомогою супутникових систем передачі.

У подібному випадку супутникові канали мовлення включають в свій склад одночасно магістральний, внутрішньозоновий та місцеві канали розподілу програм мовлення.

Тракти вторинного розподілу програм мовлення ***утворюють дві мережі***: мережу передавальних радіостанцій мовлення, які «покривають» територію, що обслуговується,електромагнітним полем достатньої інтенсивності і місцеву мережу проводового мовлення. Даний тракт закінчується на вході приймача користувача (розетки гучномовця).

4. Міжнародна стандартизація в області мовлення

Сучасні системи мовлення (як і телекомунікаційні системи) створюються на основі міжнародних стандартів. Розробкою цих стандартів займаються, зокрема:

- Міжнародний союз електрозв'язку МСЕ (ITU), в його складі є: Сектор радіозв'язку – МСЕ-Р та Сектор стандартизації – МСЕ-Т.
- Міжнародна організація по стандартизації МОС (ISO),
- Міжнародна електротехнічна комісія МЕК (IEC),
- Європейський союз мовлення (EBU),
- Європейський комітет з стандартизації в електротехніці (CENELEC),
- Європейський інститут стандартів зв'язку (ETSI).

В МСЕ-Р розробкою Рекомендацій в області мовлення займається Дослідницька комісія ДК-6 «Служби мовлення(наземні та супутникові) ». Ця комісія утворена після об'єднання раніше існуючих комісій ДК-10 «Служба звукового мовлення» та ДК-11 «Служба телебачення». Рекомендації МСЕ-Р мають статус добровільних міжнародних стандартів. У них викладені:

- принципи побудови, основні характеристики та параметри систем мовного телебачення – в серії Рекомендацій ВТ (417, 470-6, 472-3, 601-5, 653-3, 655-6, 796, 797-1, 798-1, 807, 808, 809, 810, 1117-2, 1118-1, 1119-2, 1123, 1125, 1127, 1197, 1198, 1201, 1206, 1207, 1208-1, 1298, 1299, 1300-1, 1301, 1306 - 1, 1358, 1361, 1369, 1378, 1380);
- принципи побудови, основні характеристики та параметри систем звукового мовлення – у серії BS (349, 412-9, 415-2, 707-4, 774-2, 775-1, 1116-1);
- принципи побудови, основні характеристики та параметри систем супутникового телевізійного, звукового мовлення та мовлення даних – у серії ВО (600-1, 650-2, 651, 652-1, 712-2, 786, ..., 795, 1211, 1212, 1213, 1295, 1296, 1297, 1383, 1444, 1445, 1503, 1504, 1505, 1506);
- системи запису мовної інформації – у серії BR (265-8, 657, 778-1, 1385).

У складі ДК-6 утворені Робочі групи (РГ) та Цільові групи (ЦГ) за наступними напрямками:

РГ-6А – монтаж та форматування програм,

РГ-6Е – наземне мовлення,

РГ-6М – інтерактивне і мультимедійне мовлення,

РЕ-6Р – виробництво та поствиробництво,

РЕ-6Q – оцінка характеристик і контроль якості,

РЕ-6R – запис для виробництва, архівування і відтворення, телекіно,

РF-6S – супутникове мовлення,

РГ-6/7 – параметри планування для цифрового мовлення на частотах нижче 30 МГц,

РЕ-6/8 – підготовка до Регіональної конференції радіозв'язку (з перегляду Стокгольмської угоди про розподіл частотного ресурсу для ТВ – мовлення),

РЕ-6/9 – цифрове кіно.

Дослідницькою комісією ДК-6 МСЕ-Р в 2001р. прийнята модель функцій служб мовлення та її аспекти (рис.1.11).

У МСЕ-Т в комісії ДК-9 «Інтегровані широкосмугові кабельні мережі» розглядаються служби телевізійного, звукового, мультимедійного, гіпермедійного мовлення та мовлення даних на основі кабельних систем та мікрохвильових мереж, інтегрованих з широкосмуговими інформаційними мережами та службами. При цьому стандартизацією широкосмугових систем (у тому числі й систем мовлення) займаються Робочі групи: РГ-1/9 – передача телевізійних сигналів і РГ-2/9 – передача сигналів звукового мовлення.

Дана комісія випускає Рекомендації серій: J – «Передача програм телевізійного і звукового мовлення та мультимедійних сигналів», N – «Підтримка мереж передачі програм звукового та телевізійного мовлення», серії Р.900 – «Якість зображення та звуку в мультимедійних та аудіовізуальних системах».

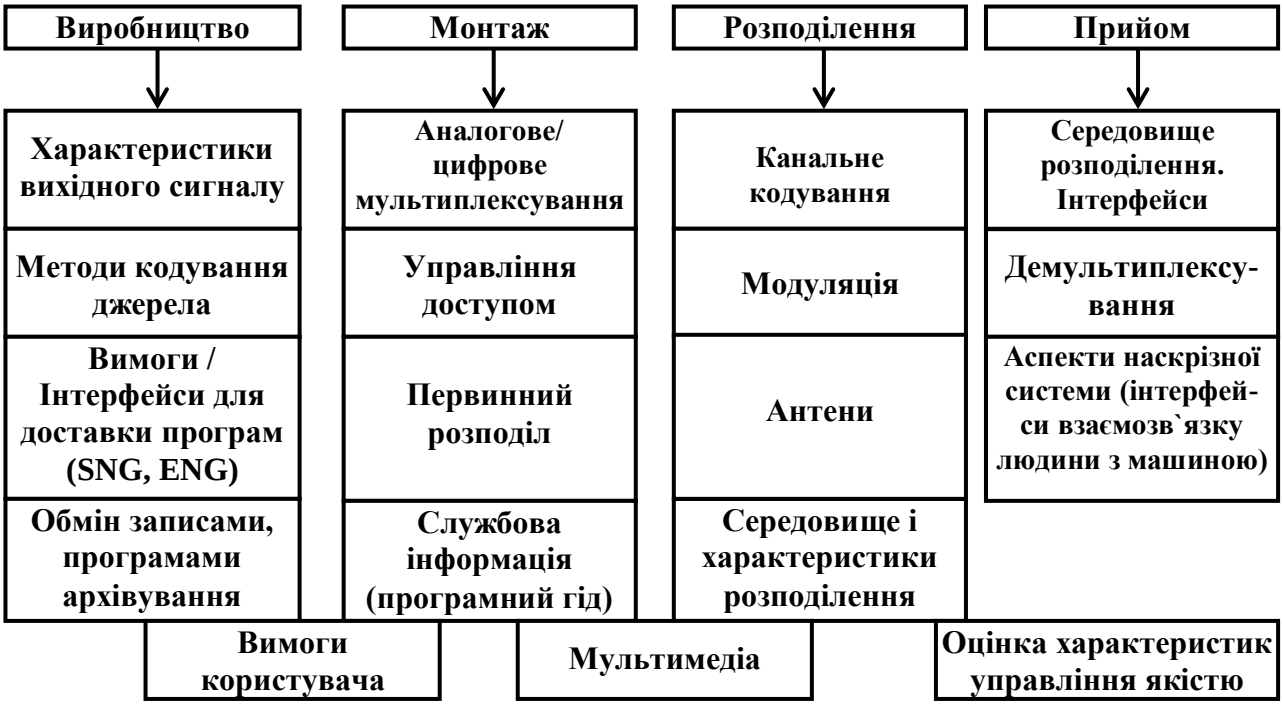


Рис.1.11. Модель служб мовлення. Основні функції та аспекти

Зокрема, у Рекомендаціях МСЕ-Т зосереджені основні характеристики таких систем: систем передачі сигналів звукового мовлення (рек. J.11, J.21, J.23,

J.51, J.53, J.54, J.55, J.56, J.57) та систем передачі телевізійних сигналів і сигналів Web-мовлення (J.61, J.68, J.73, J.75, J.77, J.80, J.81, J.82, J.83, J.84, J.85, J.86, J.91, J.94, J.112, J.150, J.163, J.183, J.184, J.200).

До кабельних розподільчих мереж відносяться наступні Рекомендації серії J: 82, 83, 84, 87, 90, 93, 94, 97, 110, 111, 112, 118, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 151, 160 ... 167, 180 ... 186, 190, 191,200.

Вимоги до кабельних систем як до засобів зв'язку визначені стандартами МЕК серії JES 60728 і європейськими стандартами серії EN 50083. До стандартів цифрового кабельного телебачення відносяться стандарти EN 300429 (для систем DVB-C), EN 300473 (для систем DVB, SMATV), **EN 300800** (для систем DVB, CATV). Зокрема, в 1982 р. МЕК прийнятий стандарт на систему «Компакт-диск». У ISO безпосереднє відношення до мовлення мають Технічні комітети ТК - 100 «Аудіо, відео та мультимедійні системи та обладнання» і ТК - 108, що займається стандартизацією безпеки згаданих систем та їх обладнання.

Об'єднаний комітет ISO/1EC JTC1 «Інформаційні технології» розглядає питання стандартизації будь-яких інформаційних технологій стосовно аудіо, відео, мультимедійних і гіпермедійних систем.

Питання для самоконтролю

1. Що відноситься до мовлення і хто ним займається?
2. За якими ознаками класифікуються види мовлення? Назвіть ці види.
3. Які міжнародні організації займаються стандартизацією в області мовлення? Що вони стандартизують?
4. Що включає канал мовлення? Які функції покладаються на тракти мереж мовлення?
5. Яким чином інтегруються мережі мовлення в транспортні телекомунікаційні мережі?
6. Які складові частини тракту формування програм мовлення?
7. Які складові частини тракту первинного розподілу програм мовлення?
8. Які складові частини тракту вторинного розподілу програм мовлення?

ДОДАТОК А. РОЗДАТНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ЛЕКЦІЇ №1

Рис.1.1. Місце мовлення в системі засобів масової інформації

Тракти і середовища розподілу програм

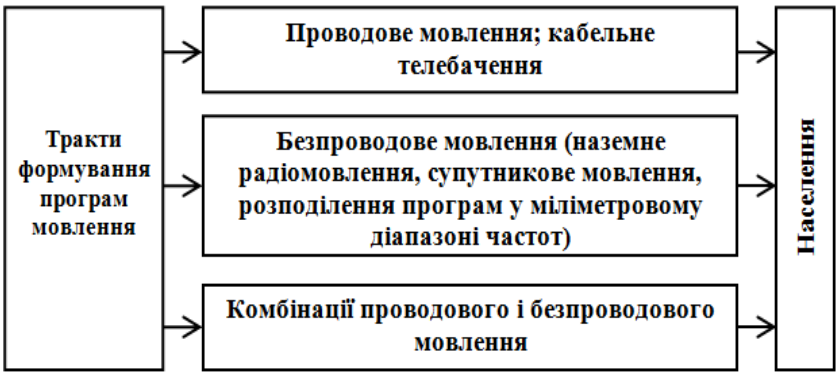


Рис.1.3. Середовище розподілу програм мовлення

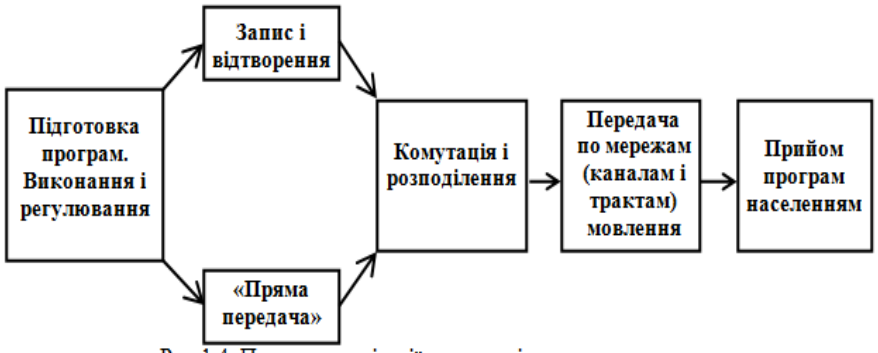


Рис.1.4. Процес організації та розподілу програм мовлення

Рис.1.5. Структура організації , що здійснює мовлення

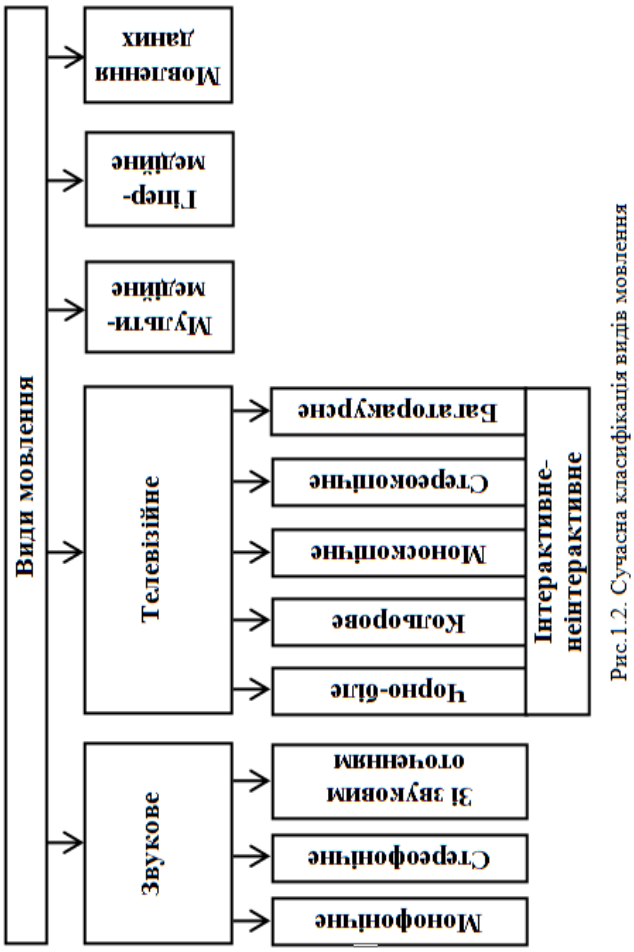


Рис.1.2. Сучасна класифікація видів мовлення

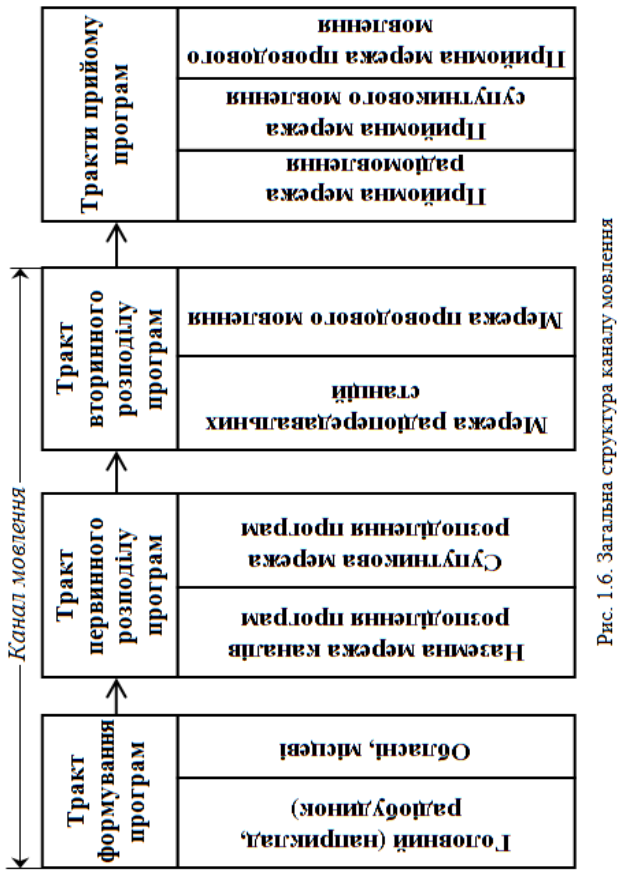
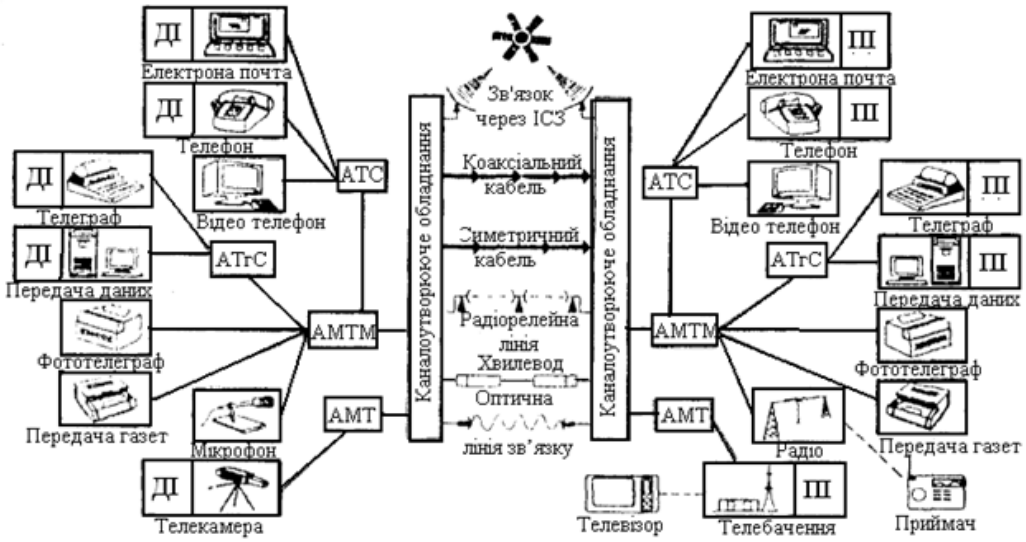


Рис. 1.6. Загальна структура каналу мовлення



Тут: АТС –*автоматична телефонна станція*; АТгС – *автоматична телеграфна станція*; АМТМ– *апаратна міжміська телефонна мережа*; АМТ – *апаратна міжміського телебачення*; ДІ – *джерела інформації*; ПІ – *приймачі інформації*.

Рис.1.7. Інтеграція служб мовлення в телекомунікаційні мережі

Рис.1.8. Головний центр тракту формування програм і тракт первинного розподілу програм мовлення

Рис.1.9. Структура обласного центру мовлення

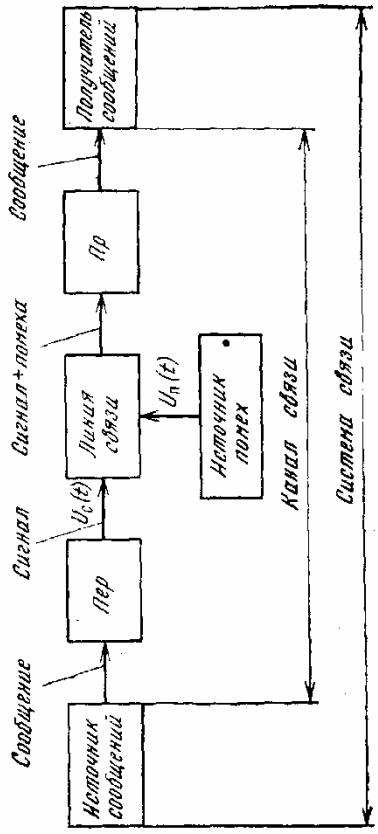


Рис. В.1. Обобщенная схема канала связи

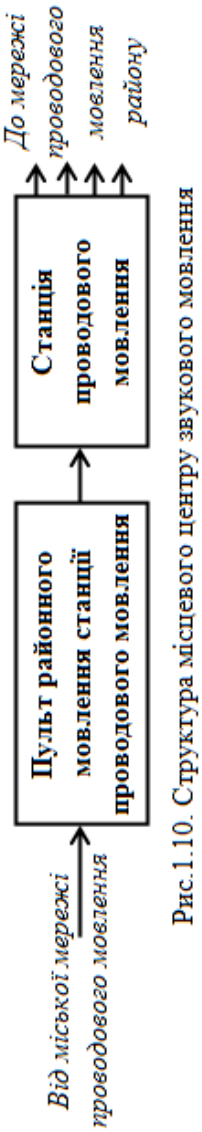


Рис.1.10. Структура місцевого центру звукового мовлення

ЛЕКЦІЯ №2 СЛУХОВА СИСТЕМА ЛЮДИНИ ТА ЇЇ ВЛАСТИВОСТІ. ОБ'ЄКТИВНІ ТА ПСИХОАКУСТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ

ЛІТЕРАТУРА:

1. Брагин А.С. Технологии вещательных служб. Часть 1. Технологии звукового радиовещания. –К.: НТУУ «КПИ», 2006.
2. Цвикер Э., Фельдкеллер Р. Ухо как приемник информации. - М: Связь, 1971. – 256 с.

РОЗДАТНИЙ МАТЕРІАЛ: див. ДОДАТОК Б

1. Будова слухової системи людини

Перш ніж викладати властивості органа слуху людини, , розглянемо будову цього органа.

Вухо складається із трьох частин: ***зовнішнього, середнього й внутрішнього***. Перші дві частини служать для підведення звукових коливань до слухового ***аналізатора***, що перебуває у внутрішнім вусі – ***равлику.***

На рис. 2.1 орган слуху представлений для наочності з "спрямленою" конструкцією равлика внутрішнього вуха. Довжина каналу равлика становить близько 35 мм.

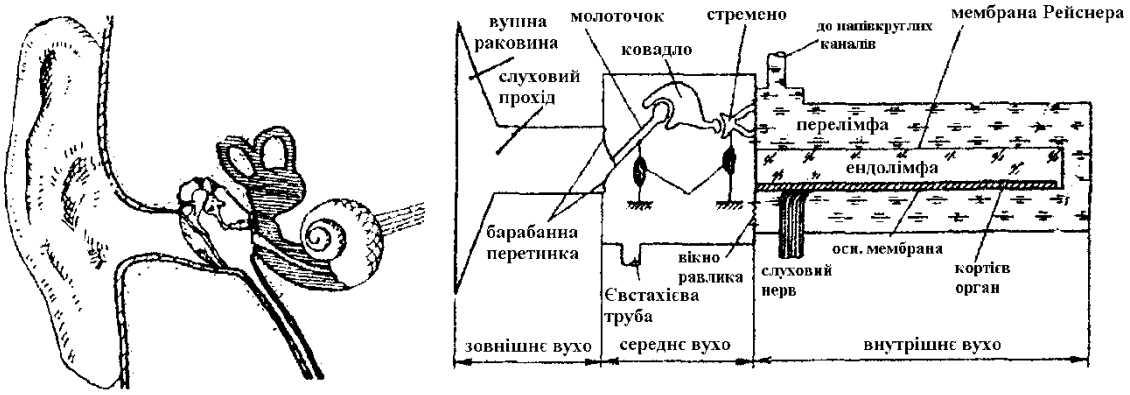


Рис. 2.1. Будова органу слуху

Звукові хвилі приймаються акустичною рупорною антеною, функції якої виконує ***вушна раковина***. Далі через слуховий прохід, що виконує функції короткого хвилеводу, звук впливає на ***барабанну перетинку***. Ця перетинка ввігнута усередину й натягнута м'язом. Перераховані елементи й утворюють зовнішнє вухо.

У порожнині середнього вуха розташовані три слухові кісточки: ***молоточок, ковадло*** й ***стремено***, які шарнірно з'єднані між собою суглобами й оснащені м'язовою тканиною із двох м'язів. Рукоятка молоточка прикріплена до барабанної перетинки, а м'яз молоточка підтримує її в натягнутому стані. Основа стремена закриває собою ***овальне вікно***, за яким перебуває внутрішнє вухо. Стремено в овальному вікні закріплено не жорстко й може робити зворотно-поступальні рухи.

Слухові кісточки утворюють систему важелів для передачі зусилля від барабанної перетинки до стремена. Цей механізм *перетворює повітряні коливання з великою амплітудою й невеликим тиском у механічні коливання стремена з невеликою амплітудою й високим тиском*. **Євстахієва труба** з'єднує барабанну порожнину з носоглоткою для вирівнювання статичних тисків по обидві сторони барабанної перетинки. Коли через застуду Євстахієва труба закупорюється, у вусі виникають неприємні відчуття.

Внутрішнє вухо складається із двох частин: ***равлика*** (спірального каналу, схожого на раковину равлика) і ***трьох напівкруглих каналів*** (останні відносяться до органів рівноваги й руху). Равлик розділений на три заповнених рідиною спіральних канали, розділених двома перетинками –***основною мембраною*** й ***мембраною Рейснера***. Ці канали називаються ***сходами переддвір'я***, ***серединними сходами*** й ***сходами барабана***. Серединні сходи заповнені ***ендолімфою***, а дві інші –***перелімфою***. Перелімфатичні порожнини з'єднуються між собою через отвори поблизу вершини равлика, яка називається ***гелікотермою***. Ендолімфа й перелімфа мають різні значення в'язкості й щільності.

Основна мембрана являє собою аморфну не натягнуту перетинку, закріплену покраях, і складається з декількох тисяч волокон, натягнутих поперек равлика. Волокна слабко зв'язані між собою й тому можуть коливатися незалежно. З боку ендолімфи на основній мембрані розташований ***кортієв орган***. Він містить близько 22 тисяч чутливих волосяних клітин, чутливих до тиску й деформацій основної мембрани. З волосяними клітинами контактують закінчення нервових волокон, які поєднуються в пучок,який називається ***слуховим нервом***. Він направляється до равликового ядра стовбуру головного мозку.

При звукових коливаннях стремінце приводить в рух мембрану овального вікна. Під дією цих коливань мембрана круглого вікна коливається в такт із мембраною овального, тому що лімфа практично нестислива. Лімфа коливається дотично до поверхні основної мембрани, поперек її волокнам.

На коливання лімфи озиваються (резонують) тільки цілком певні волокна залежно від частоти. Біля гелікотерми розташовані найбільш довгі волокна, що резонують на низьких частотах. У основі равлика (між овальним і круглим вікнами) розташовані найбільш короткі волокна, які резонують на високих частотах. Складний звук, що складається з декількох частотних складових, що далеко рознесені почастоті один від одного, збуджує кілька груп волокон.

Таким чином, *основна мембрана виконує функцію частотного аналізатора*. Він дозволяє сприймати звуки в досить широкому діапазоні частот (20 ... 20000 Гц). Вони називаються *звуковими*. Коливання із частотами нижче 20 Гц, називаються ***інфразвуками***, а коливання із частотами вище 20000 Гц – ***ультразвуками***.

Відзначимо, що діапазон частот звукових коливань, створених голосовим апаратом людини *більш вузький* (основна енергія мови перебуває в смузі частот до 2000 Гц). Це означає, що слухові можливості людини багатші

звуковідтворюючих можливостей голосового апарату – він може сприймати звуки інших джерел, зокрема – музичних інструментів. Смуги пропускання елементарних резонаторів органа слуху, визначені за рівнем 0,707, на частотах до 500 Гц становлять близько 7...10 % від середньої частоти й змінюються мало, а вище 500 Гц – близько 5 % і лінійно зростають із частотою. Тобто "смуга пропускання" у резонаторів слухового аналізатора становить від 35 до 200 Гц.

Через обмеженість числа нервових закінчень уздовж основної мембрани, **людина розрізняє у всьому частотному діапазоні не більше 250 градацій частоти**.

Число цих градацій різко спадає зі зменшенням інтенсивності звуку – у середньому воно становить близько 150.

Згадані смуги частот *варто відрізняти від* ***критичних смуг слуху*** (частотних груп), ***які не залежать від інтенсивності звуку*** й про які мова йде в п. 2.3.1.

Не всі слухачі зауважують різницю у звучанні, якщо частоти відрізняються менш чим на 4%. Вухо професійних музикантів більш чутливе до зміни частоти й може розрізняти синусоїдальні коливання, що відрізняються по частоті на 0,2...0 ,3% в інтервалі 500 ... 4000 Гц. Музиканти з унікальним слухом можуть відрізняти коливання з різницею частот в одиниці герц.

Якщо волокно основної мембрани при своїх коливаннях не дістає до найближчої волосяної клітини, то людина звук не сприймає. При збільшенні амплітуди коливань волокна, як тільки воно торкнеться найближчої клітини, звук буде почутий. Цей стрибкоподібний перехід від чутного стану в нечутний й назад називається ***порогом чутності.*** При збільшенні інтенсивності звуку вище допустимої, поки амплітуда коливань волокон не збільшиться настільки, щоб торкнутися ще однієї клітини, слухове відчуття залишається постійним. Як тільки одне з волокон торкнеться наступної клітини, слухове відчуття ще раз підвищиться стрибком. Такі перегони називаються ***порогом розрізнення інтенсивності звуку.***

Або інакше: слухове відчуття наростає стрибками в міру збільшення числа збуджених клітин. Для середніх і високих інтенсивностей звуку стрибок виходить при однакових відносних змінах інтенсивності звуку.

Число цих стрибків на середніх частотах не перевищує 250.

2. Види звукових коливань, що сприймаються слухом

Впливаючи на орган слуху, звук викликає подразнення, яке називається ***стимулом***.

У свою чергу *подразнення створює в людини суб'єктивний ефект –* ***відчуття***.

Як подразнення, так і відчуття істотно залежать від характеру звуку. Корисно мати їхню класифікацію.

Чисті тони. У цьому випадку звуковий тиск описується синусоїдальною функцією часу із приблизно постійними амплітудою й частотою. Тони на слух сприймаються як тихі або гучні залежно від амплітуди, високі або низькі залежно від частоти.

Співзвуччя. Це стаціонарний звук, що складається з декількох тонів, наприклад, звук дзвона. У більшості випадків під співзвуччям розуміється комбінація основного тону й декількох обертонів. Звуковий тиск співзвуччя являє собою майже періодичну функцію часу з лінійчатим спектром і приблизно однаковими його складовими (основне коливання не домінує). До співзвуч відносяться голосні звуки мови.

Амплітудно-модульовані звукові коливання.Більшість чутних звуків є нестаціонарними. Їхня амплітуда змінюється. Прикладом амплітудно-модульованого звукового коливання є звук свистка спортивного судді. Середня частота звуку (несуче коливання) становить 1...2 кГц, а частота, що модулює – 5...25 Гц. Модуляція періодична, але не синусоїдальна. Ширина спектру такого коливання з бічними складовими не велика.

Частотно-модульовані звукові коливання. Таке коливання характеризується середньою частотою спектра й індексом кутової модуляції. При малих індексах модуляції (не більше 1) спектр близький до спектра амплітудно-модульованого звукового коливання. Відстань між складовими спектру дорівнює модулюючій частоті. Прикладом таких коливань є музичні звуки **з *вібрато***. У скрипковій грі девіація частоти основного тону може досягати 10 Гц при частоті модуляції 3 Гц. Індекс модуляції близький до 3, а спектр займає смугу 440 ±13 Гц.

Биття. Два тони з однаковими амплітудами й частотами, але з різницею фаз, сприймаються на слух як періодична зміна гучності тону, що й називається биттям. Такий звук має орган.

Шуми. Звуки, спектр яких безперервний, називаються шумами. Найважливішою характеристикою шуму є частотна залежність спектральної щільності потужності. Залежно від форми обвідної спектральної щільності потужності шуму вони мають умовні назви: ***білий, рожевий і рівномірно маскуючий*.**

*У **білого шуму***рівень спектральної щільності потужності не залежить від частоти. У лінійній шкалі частот його графік має вигляд прямої лінії, паралельної осі частот, а в октавній шкалі частот (рис. 2.2) - лінію 1. Графік рівня спектральної щільності потужності ***рожевого шуму*** має вигляд прямої лінії 2. ***Рівномірний маскуючий шум*** (лінія 3) до частоти 500 Гц має характеристики білого шуму, а вище цієї частоти – характеристики рожевого шуму.

Введення поняття "рівномірно маскуючого шуму" прив'язано до критичних смуг слуху, які до 500 Гц приблизно однакові по ширині, а вище 500 Гц – ширина критичної смуги лінійно зростає із частотою. ***Цей шум однаково маскує тональні звуки у всьому звуковому діапазоні частот*.** Його можна

сформувати з білого шуму за допомогою фільтра, що має коефіцієнт передачі зі спадом 3 дБ/октаву.

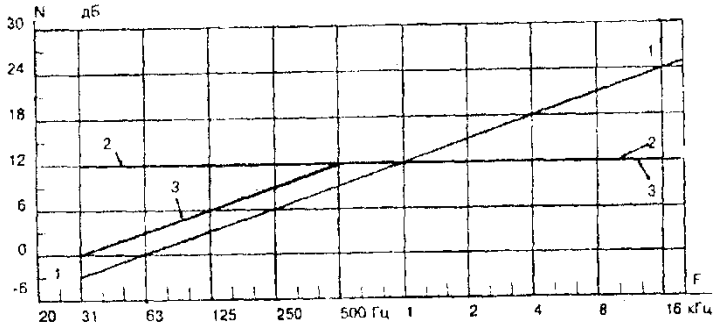


Рис. 2.2. Частотна залежність спектральної щільності потужності шумів

Залежно від ширини спектру шум може бути ***широкосмуговим***, ***вузькосмуговим***, октавним, третьоктавним і ін.

Вузькосмуговий шум супроводжує звуки майже всіх вокальних інструментів. Граючи на флейті, музикант збуджує не тільки періодичне звукове коливання, але й вузькосмуговий шум від вдування повітря. Це надає виразність звучанню. Такі шуми виникають при грі на смичкових інструментах, а також у мові й співі.

3. Об’єктивні параметри звуків

Подразнення і його параметри (характеристики) – це фізичні величини, які можуть бути виміряні. Тому вони***об'єктивні.***

Параметри (характеристики) відчуття, інакше називаються ***психоакустичними параметрами***, виміряти не можна. Про них можна лише скласти уявлення на підставі словесного опису випробуваного. Вони суб'єктивні.

Розглянемо спочатку об'єктивні характеристики звуків будь-якого походження.

3.1 Параметри звукового поля

Простір, у якому відбувається поширення звукових хвиль, називається***звуковим полем.*** Зміна стану середовища під дією звукових хвиль характеризується звуковим тиском і коливальною швидкістю частинок середовища.

Звуковий тиск. Різниця між миттєвим значенням тиску середовища, збуреного звуковим полем, і середнім тиском у відсутності звукового поля називається ***звуковим тиском***. Звуковий тиск виміряється в паскалях (Па). Тиск в один паскаль (Па) створюється при дії сили в один ньютон (Н) на поверхню площею 1 м^2 (Па = Н/м^2). Один паскаль в 10^5 раз менше нормального атмосферного тиску. В акустику мають справу з звуковим тиском не більше 100

Па. Нормоване (щодо величини $\mathbf{p}_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па) значення звукового тиску $\mathbf{p}_{зв}$ виражається в децибелах:

$$N = 20 \lg(\mathbf{p}_{зв} / \mathbf{p}_0). \qquad (2.1)$$

Інтенсивність звуку.Енергія, яка переноситься звуковою хвилею характеризується інтенсивністю (I). *Інтенсивність (сила) звуку* – це середня кількість звукової енергії, що проходить за одиницю часу через одиничну площадку, розташовану нормально до напрямку поширення звукової хвилі (тобто потужність, яка переноситься звуковою хвилею через одиничну площадку й вимірювана у ватах на м^2). Нормоване (відносно $\mathbf{I}_0 = 10^{-12}$ Дж/м^2) значення інтенсивності звуку $\mathbf{I}_{зв}$ вимірюється в дБ:

$$N = 10 \lg(\mathbf{I}_{зв} / \mathbf{I}_0). \qquad (2.2)$$

Виражені в децибелах (щодо нормованого значення) звуковий тиск і інтенсивність в одній і тій же точці поля кількісно збігаються й іменуються *"рівнем поля"*.

При дослідженні сприйняття змін інтенсивності звуку було встановлено, *що однакові зміни інтенсивності викликають однакові абсолютні зміни слухового відчуття.*

Спектральна щільність потужності звуку.Спектральна щільність потужності звуку характеризує розподіл інтенсивності звуку по частоті й вимірюється у Вт/(м^2 Гц). Чисельно вона дорівнює інтенсивності звуку в смужці шириною 1Гц. Для більшості музичних інструментів спектральна щільність потужності звуку рівномірна до 3,5...4 кГц і далі спадає з крутістю 6 дБ/октаву.

Швидкість звуку.Швидкість поширення звукової хвилі в повітрі (швидкість звуку) $c_{зв}$ в основному залежить від метеорологічних умов і температури.

З достатньою точністю для технічних розрахунків можна вважати $c_{зв} = 331\sqrt{T/273}$, деT - абсолютна температура повітря в кельвінах. При нормальному атмосферному тиску й температурі T = 290К (17°С) швидкість звуку $c_{зв}$ = 340 м/с. Саме це значення використовується в технічних розрахунках. Якщо джерело звуку робить коливання по гармонічному закону із частотою **F**, то за час **T**, протягом якого відбувається один період коливання джерела, фронт звукової хвилі переміститься на відстань, що рівнює довжині хвилі $\lambda = c_{зв}\mathbf{T} = c_{зв}/\mathbf{F}$.

3.2 Статистичні характеристики звукових сигналів

Знання статистичних характеристик дозволяє правильно сформулювати вимоги до каналів і трактів передачі сигналів мовлення з урахуванням особливостей сприйняття сигналів слухачами, оскільки метою мовлення являється донесення до нього сигналу мовлення по можливості без спотворення (тобто із заданою якістю).

Музичні інструменти й голос людини створюють складні звукові коливання. Форма звукової хвилі навіть для стаціонарного сигналу різко відрізняється від синусоїдальної й може бути несиметричною. Таку ж форму має й електричний сигнал у каналі мовлення, одержуваний з акустичного після механікоелектричного перетворення (у ланцюзі після мікрофона).

Наведеним вище відносним акустичним рівням звукового тиску в децибелах (або рівним їм рівням інтенсивності звуку $N = 20\lg(\mathbf{p}_{зв}/\mathbf{p}_0) = 10\lg(\mathbf{I}_{зв}/\mathbf{I}_0)$) у цьому випадку ставляться у відповідність відносні електричні рівні напруги **U** або потужності **P** (на певній величині навантаження **R**). Оскільки потужність пропорційна квадрату напруги й обернено пропорційна опору навантаження, то вираз для рівня потужності й рівня напруги може бути представлений (при рівності опорів) у вигляді

$$N_{[дБ]} = 20\lg(\mathbf{U}/\mathbf{U}_0) = 10\lg(\mathbf{P}/\mathbf{P}_0). \qquad (2.4)$$

Якщо нуль шкали електричних рівнів відповідає потужності $\mathbf{P}_0$ = 1 мВт, то визначені в такий спосіб рівні називаються ***абсолютними електричними.*** Прийнявши опір навантаження рівним R = 600 Ом, одержимо значення напруги, що відповідає нулю шкали абсолютних рівнів $\mathbf{U}_0 = \sqrt{10^{-3} \cdot 600} = 0{,}775$ В.

Величини потужності у мовному каналі бувають більше або менше $\mathbf{P}_0$. Тому абсолютні електричні рівні бувають позитивними й негативними.

На рис. 2.3 представлені дляприкладу осцилограми звуку кларнета (а) і звуку "а" у слові "зима" (б).

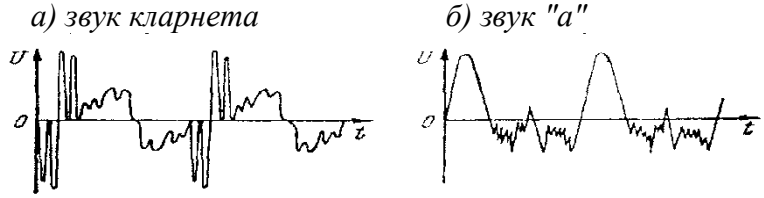


Рис. 2.3. Відрізки осцилограм звуку

Величина електричного коливання, що відображає звучання музики або мови, безперервна й змінюється в більших межах. За аналогією з поняттям абсолютного рівня синусоїдального коливання введене поняття ***абсолютного динамічного рівня сигналу мовлення***. Словом "динамічний" підкреслюється нестаціонарність сигналу мовлення.

Згаданий рівень виражається співвідношенням (2.4) із застереженням, що під напругою U розуміється ***усереднена величина випрямлених миттєвих значень електричного сигналу***, одержуваних за допомогою особливого електронного вольтметра зі стандартизованими часовими параметрами (часом інтеграції, обумовленим постійною часу фільтра після детектора). Такі вольтметри називаються ***покажчиками рівня***. Якщо тривалість усереднення відносно мала, то розподіл рівнів сигналів мовлення близький до розподілів миттєвих значень. Зі збільшенням тривалості усереднення закон розподілу рівнів наближається до нормального. При дуже великому часі інтеграції поняття закону розподілу втрачає зміст.

Для підтримки величин сигналу по всьому каналу мовлення відповідно до заданої діаграми рівня треба користуватися приладами з однаковими параметрами. Тому параметри покажчиків рівня стандартизуються. Вони визначені в ДСТУ ГОСТ 21185.

При проектуванні пристроїв автоматичного контролю каналів мовлення, а також при вирішені задач, пов'язаних з компресією сигналів мовлення і при розпізнаванні звукових образів, необхідно мати дані про розподіл тривалості викидів обвідної й розподілі пауз сигналів мовлення.

Так, найбільш часто з'являються паузи тривалістю 50 ... 150 мс і дуже рідко – паузи 2...3 с. Відзначено, що тривалість пауз мало залежить від типу програм (музика, мова). Кількість пауз за годину припередачі мовних програм доходить до 900, а в музичних передачах – близько 200.

Середній час тривалості всіх пауз активної (не підготовленої заздалегідь) мови становить біля половини часу передачі. Даний факт свідчить на користь пакетної передачі мови й може бути врахований при проектуванні систем з часовим поділом каналів. *Імовірність появи сигналу з певною величиною рівня можна визначити з**рівнеграм*** (які можна одержати за допомогою самозаписувача), рис. 2.4.

а) б)

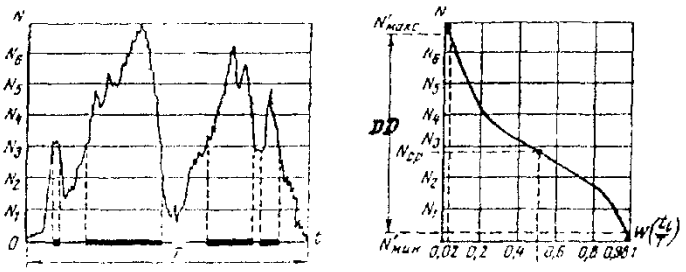


Рис. 2.4. Рівнеграма сигналу мовлення (а) і отриманий з неї графік розподілу заданого рівня

На рис. 2.4,а жирними лініями показані відрізки часу, протягом яких рівні перевершують, наприклад, величину N_3.

Квантилі.Якщо загальний час спостереження дорівнює **T**, а сумарна тривалість перевищення заданого рівня t_i, то відношення t_i /**T** називається частотою перевищення відповідного рівня N_i (квантиля). При досить великій кількості дослідів частоти переходить в ймовірність $W(t_i/T)$. ***Квантилем** називається* значення рівня **N** при заданому значенні функції розподілу (у часі).

Найбільші й найменші рівні зустрічаються порівняно рідко. Введено поняття квазімаксимального рівня $N_{кв.макс}$, імовірність перевищення якого досить мала й наперед задана. Наприклад, якщо ця ймовірність дорівнює 0,02, то це означає, що максимальний рівень може бути перевищений протягом не більше 2% часу даного виконання. Його позначають як квантиль **N**(0,02). Рівні вище квазімаксимального практично можна не враховувати. Квазімінімальним рівнем $N_{кв.мін}$ називають рівень, імовірність перевищення якого досить велика, наприклад, дорівнює 0,98 квантиль **N**(0,98). Імовірність появи рівнів менше квазімінімального мала, тому їх теж можна не враховувати Середнє (медіанне) значення рівня визначається величиною **W = 0,5**: квантиль **N**(0,5).

Динамічний діапазон. Одним з основних параметрів сигналу мовлення є ***динамічний діапазон***. Динамічний діапазон звукових тисків визначається як відношення

$$\mathbf{DD}_{[\text{дБ}]} = 20\lg\left(\mathbf{p}_{\text{зв.макс}}/\mathbf{p}_{\text{зв.мін}}\right), \qquad (2.5)$$

а динамічний діапазон відповідних їм електричних напруг

$$\mathbf{DD}_{[\text{дБ}]} = 20\lg\left(\mathbf{U}_{\text{макс}}/\mathbf{U}_{\text{мін}}\right). \qquad (2.6)$$

Розрізняють природний динамічний діапазон (наприклад музичного твору й мови при їхньому виконанні в концертному залі або студії мовлення) і ***динамічний діапазону місцях прослуховування*** (наприклад, у квартирі слухача). Перший визначається відношенням максимального звукового тиску при найбільшій гучності виконання до мінімального звукового тиску при найменшій гучності, а другий – відношенням максимального звукового тиску, при якому створюються ще припустимі перешкоди в сусідніх приміщеннях (квартирах), до мінімального звукового тиску, що ще не маскується акустичними шумами в місці розташування слухача.

Поширене ще одне поняття – **динамічного діапазону в якій-небудь** точці електричного каналу мовлення $\mathbf{DD_К}$, рис. 2.5.

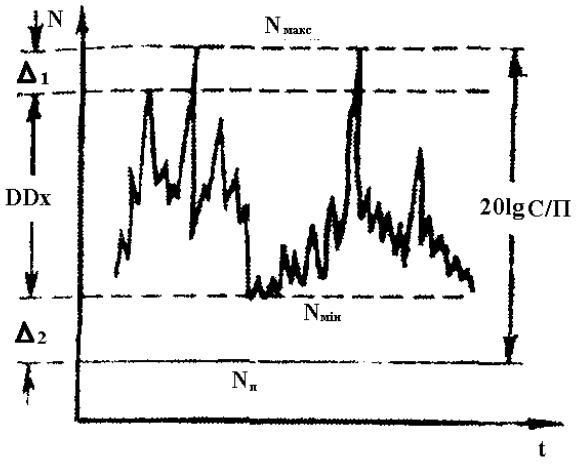


Рис. 2.5. До визначення динамічного діапазону каналу мовлення

Величина $\mathbf{DD_К}$ вираховується відніманням із відношення сигнал/завада ($\mathbf{U_{макс}}$ /$\mathbf{U_з}$, вираженого в одиницях рівня) суми допуску Δ_1 (встановлений для запобіганняперемодуляції й спотворювань нечастими піками рівня сигналу) і допуску Δ_2 (на необхідне перевищення перешкод і шумів $\mathbf{N_п}$ мінімальним сигналом $\mathbf{N_{мін}}$): $\mathbf{DD}_{[\text{дБ}]} = 20\lg\left(\mathbf{U}_{\text{макс}}/\mathbf{U}_{\text{п}}\right) - \left(\Delta_1 + \Delta_2\right)$.

Згадані визначення динамічного діапазону **DD** не містять вказівок про те, які саме максимальні й мінімальні тиски (або напруги) маються на увазі. Мовний сигнал – випадковий процес. Тому не байдуже, чи вимірюють миттєві, середньоквадратичні, пікові або іншим способом усереднені величини сигналу, оскільки між цими величинами немає певної залежності.

Найчастіше **DD** прийнято визначати статистичним шляхом як різницю квазімаксимального й квазімінімального рівнів (квантилей) мовного сигналу.

Для мовних передач прийнято $\mathbf{DD_{мови}}$ = **N**(0,99) - **N**(0,01), а для музичних передач $\mathbf{DD_{муз}}$ = **N**(0,98) - **N**(0,02).

На рис. 2.6,а представлені три функції розподілу рівнів різних музичних програм, обмірювані в широкій області значень **N**, і показане визначення **DD$_{муз}$**) через квантилі розподілів (за 0 дБ прийнята медіана розподілів). На мал. 2.6,б ті ж побудови виконані для мовного сигналу.

Значення **DD** (у дБ) найпоширеніших звукових програм до (натуральне звучання) і після (фонограма) їхнього регулювання звукорежисером представлені в табл. 2.1.

Для проектування й експлуатації апаратури (каналів звукового мовлення) необхідні відомості *про відносну середню потужність сигналів* **P$_{ср}$** на певних відрізках часу й *величині пікфактора***П**.

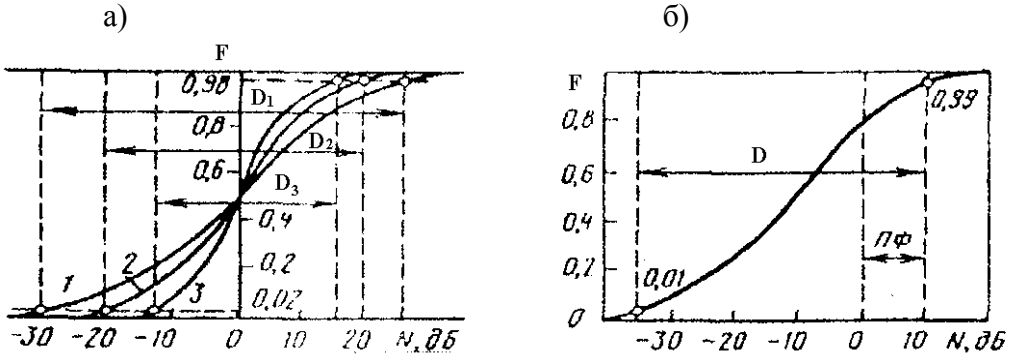


Рис. 2.6. Визначення динамічного діапазону й пікфактора сигналів по квантилям розподілу рівнів

Їхнє знання необхідно для забезпечення якості передачі програм по мовних каналах (для захисту каналу від перевантажень, а переданого сигналу – від спотворень).

Розрізняють ***довгострокову*** (за добу), ***середньохвилинну*** (за одину хвилину) і ***середньосекундну*** (за секунду) відносні потужності (вони нормуються відносно максимального неспотвореного синусоїдального сигналу в каналі звукового мовлення, прийнятого за нуль дБ).

Таблиця 2.1. Динамічний діапазон деяких звукових програм

Вид програми	**Натуральне звучання, дБ**	**Фонограма, дБ**
Мова диктора	25…35	15…20
Акторська мова	35…45	25…30
Малі ансамблі	45…55	35…40
Симфонічний оркестр	65…75	40…45

Дляканалів установлюється довгострокова (наприклад, -10,5 дБ із імовірністю 99%) потужність або відповідна їй середньохвилинна потужність (наприклад, -6 дБ із тією ж ймовірністю).

Відносні середні потужності для симфонічної музики (а), для мови й хорового виконання (б) і для естрадного й духового оркестру (в) орієнтовно рівні 3, 6 і 10...12 дБ. Отже, при установці середніх рівнів у мовному каналі найменший установлюється для симфонічної музики, а найбільший – при передачі естрадної й джазової музики. При дотриманні цих умов вузли каналу передачі не перевантажуються, не збільшуються спотворення й перехідні завадиміж каналами.

Пікфактором сигналу називається відношення (у разах або децибелах) його найбільшого (по абсолютній величині) миттєвого значення до середньоквадратичного (за час не менше інтервалу однорідності, стаціонарності).

Відзначимо, що при побудові кривої розподілу на мал. 2.4,б за нуль дБ була прийнята середня потужність, а пікфактор визначений як різниця із квантилем N(0,99). Це – наближене відшукання пікфактора не відповідає строгому його визначенню. Проте немає необхідності прив'язки до двох різних вимірювальних ланцюгів, необхідних для виміру, оскільки визначення пікового й середньоквадратичного значення вимагають використання двох *різних детекторів* у вимірювачі.

Пікфактор сигналів оркестру становить до 28 дБ (у середньому для різних складів близько 19 дБ), рояля – 10 дБ, сигналу мовлення – 12 дБ. Для мовних сигналів у каналах тональної частоти (0,3...3,4) кГц величина пікфактора становить близько 3,3 (10 дБ).

3.3. Спектральні характеристики й кореляційні властивості звукових сигналів

Для формулювання вимог до технічних характеристик різних ланок мовного тракту *необхідно знати розподіл рівнів по частоті*.

Щоб його визначити, у заданій точці тракту (наприклад, на виході якої-небудь ланки мовного каналу) вимірюються максимальні й середні значення рівнів (і потужностей) вимірювачами, що мають на вході фільтр із вузькою смугою пропускання $\Delta\mathbf{F_ф}$ і частотою настроювання фільтра $\mathbf{F_ф}$ в інтервалі звукових частот. В якості таких фільтрів використовуються третьоктавні, напівоктавні або октавні. Сукупність фільтрів повинна охоплювати весь діапазон досліджуваних частот. Є вимірювачі з фільтрами, у яких смуга пропускання $\Delta\mathbf{F_ф}$ не залежить від частоти настроювання фільтра $\mathbf{F_ф}$.

Якщо виміряні в згаданих смугах потужності розділити на ширину $\Delta\mathbf{F_ф}$, то отримані величини будуть характеризувати спектральну щільність потужності, усереднену по смузі й віднесену до середньої частоти цієї смуги $\mathbf{F_ф}$. Результат спектрального аналізу уривка оркестрової музики у всьому інтервалі досліджуваних звукових частот (наприклад, в межах $\mathbf{F_ф}$ від 30 Гц до 9 кГц) наведені на рис. 2.7.

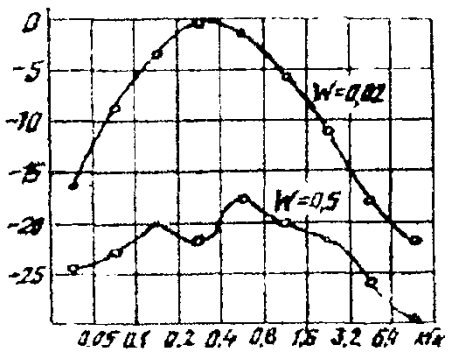


Рис. 2.7. Спектральна щільність квазімаксимальної N(0,02) і середньої N(0,5) потужності уривка оркестрової музики

Зіставляючи його зі смугою пропускання тракту звукового мовлення, можна судити про

наявність або відсутність частотних спотворень сигналу на виході тракту. Тут за нуль дБ прийнятий квазімаксимальний рівень, зареєстрований у смузі частот 200 ... 400 Гц. Криві спектральної щільності характеризують частотний діапазон звуків (і сигналів, що його відображають).

Рис. 2.8,а містить відомості про орієнтовні межі частотних діапазонів деяких джерел звуку, а рис. 2.8,б – про частотний спектр різних звуків.

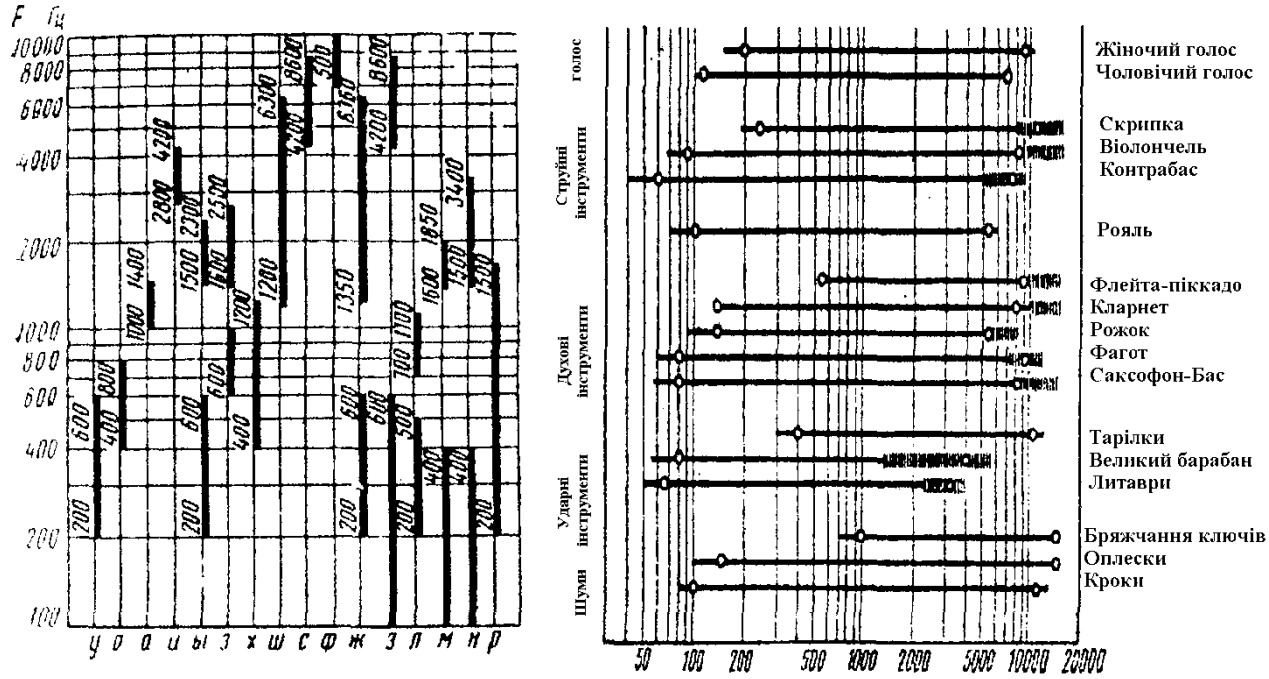


Рис. 2.8. Орієнтовні межі частотних діапазонів деяких джерел звуку (а) і спектри деяких музичних звуків (б)

Звуження розглянутих діапазонів супроводжується збільшенням спотворень сприйнятих сигналів, оскільки не всі спектральні складові мовного сигналу досягнуть слухача.

Сигнал мови й музики можна представити сукупністю періодичних і неперіодичних коливань. ***Мова людини*** складається зі сполучення голосних і приголосних звуків. Голосні звуки характеризуються ***основним тоном*** і ***формантами***. Останні представляють області концентрації енергії в деяких смугах діапазону звукових частот. *Основний тон чоловічих голосів* лежить в області частот 70 ... 250 Гц, а жіночих – в області 200 ... 450 Гц.

Основний тон визначає висоту голосу. Форманти перебувають переважно в області 300 ... 3000 Гц. Наявність у голосі обертонів у тому або іншому співвідношенні надає голосу ***тембр.***

Для того, щоб мова була розбірлива, необхідно відтворити діапазон звуків, у яких перебувають основні форманти (від 200 до 3000 Гц), *а для високоякісного відтворення тембру кожного індивідуального голосу необхідно відтворити (а перед цим – передати по каналу) коливання із частотами від 80 до 8000 Гц (голос чоловіка), від 200 до 10000 Гц (голос жінки), від 30 до 8000 Гц*

(рояль), 80 ... 12000 Гц (віолончель), 100 ... 7000 Гц (тромбон), 200 ... 13000 Гц (скрипка).

Орієнтовно спектр музичних звуків простягається від 30...40 Гц до 14...18 кГц.

Окремі інструменти (наприклад, смичкові й духові), крім музичних звуків, створюють характерні супроводжуючі їх шуми. Частотний діапазон цих шумівпоказаний на рис.2.8,б вертикальною штриховкою. Встановлено, що максимум спектральної потужності спостерігається в області частот 200 ... 400 Гц, а на більш високих частотах спектральна щільність середньої потужності всіх типів мовних програм істотно знижується.

Становить інтерес величина коефіцієнта взаємної кореляції, що дозволяє одержати загальне поняття про зміну сигналу в часі без розкладання його на спектральніскладові.

Кореляція – це статистичний зв'язок між двома різними сигналами або між прямим сигналом від джерела й сигналом, затриманим на певний час (наприклад сигналом, відбитим від стін студії або залу).

Знайдено, що коефіцієнт автокореляції в області малих зсувів сигналів (до 2 мс) дуже швидко спадає, а *при зрушенні 10 мс сигнали можна вважати некорельованими.*

4. Психоакустичні параметри звуків

4.1. Висота тону як психоакустичний параметр

Якість звучання програми мовлення, незалежно від її "наповнення", **оцінюється по слуховому сприйняттю, тобто суб'єктивно.**

Сприйняттям у загальному випадку називається обумовлений зовнішніми впливами на органи почуттів пізнавальний процес, у якому предмети і явища відбиваються у вигляді образів (для зору – символів, зображень).

Звуковий образяк відбиття у свідомості слухача акустичного сигналу від певного джерела звуку – поняття з недостатньо чітким визначенням. Кожний звуковий образ містить інформацію про *висоту тону*, якщо така піддається визначенню (бувають і нетональні звуки), про *гучність звуку*, і *тембр звуку*, про *напрямок на джерело звуку* і його *дальність* (у сукупності – про місцезнаходження джерела).

Оскільки якістьзвучання мовної програми оцінюється по слуховому сприйняттю, то **технічні вимоги, які пред'являються до мовного каналу або його ланок, визначаються шляхом дослідження закономірностей, що зв'язують***суб'єктивне відчуття звуку з об'єктивними, фізичними характеристиками звуку*. Ці закономірності виходять найбільш простими для синусоїдальних коливань, які характеризуються двома параметрами – частотою **F** і амплітудою.

З боку входу слухового апарату людини параметрами сигналу для нього є тільки частота акустичних коливань **F** і звуковий тиск (інтенсивність), а з боку виходу (психоакустичне сприйняття) – висота тону **H** і гучність.

Розглянемо *висоту тону* як кількісну міру відчуття, для якого головним параметром подразнення є частота.

Примітка. Сигнали, яким можна поставити у відповідність (приписати) певне значення висоти тону, називаються ***тональними*.** Найпростіший тональний сигнал відповідає згаданому синусоїдальному звуковому стимулу (подразнику). Несинусоїдальні тональні сигнали не зобов'язані бути періодичними функціями. Бувають також хаотичні й імпульсні тональні сигнали. Мало того, успектрі тонального сигналу може й не бути складових із частотою, *еквівалентною* (по висоті тону) синусоїдальному сигналу.

Запропоновано кілька моделей відповідності між висотою тону **H** і частотою **F**. Кожному значенню частоти в герцах відповідає єдине значення висоти тону по тій або іншій шкалі (існує декілька психоакустичних шкал висоти тону) і, навпаки, *кожному значенню висоти тону відповідає єдине значення частоти*.

Для будь-якого іншого акустичного сигналу підбирається на слух синусоїдальний сигнал, еквівалентний йому по висоті тону, потім виміряється його частота й відбивається на сенсорній характеристиці в координатах "частота – висота тону".

На рис. 2.9 представлена шкала висоти тону від частоти (по Е. Цвіккеру й Р. Фельдкеллеру [2]).

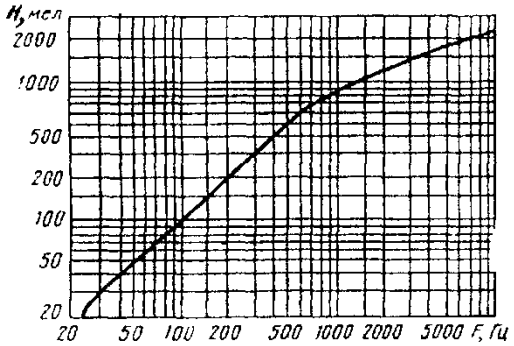


Рис. 2.9. Сенсорна характеристика висоти тону

Подібно до того, коли параметром подразнення (стимулу) обраний ***герц***, за одиницю висоти тону як параметра відчуття (реакції на стимул) обраний ***мел*** (від терміну – мелодія). В області частот нижче 500 Гц чисельні значення висоти тону в *мелах* практично дорівнюють чисельним значенням частоти в *герцах*. Вихідною точкою для побудови цієї залежності послужив ***тональний стимул*** (подразник) "до" малої октави й було прийнято, що основній частоті стимулу 131 Гц відповідає висота тону 131 мел.

Крива адекватно відображає сприйняття висоти тону в основному частотному діапазоні музичних звуків і добре узгоджується зі способом кодування частоти сигналу в слуховій системі людини.

Широке застосування знаходить *музична шкала висоти тону*. В її основі лежить тональний інтервал в одну октаву. *Октавою* називається інтервал

частот звукових коливань із верхньою частотою $\mathbf{F_в}$і нижньою частотою $\mathbf{F_н}$, причому $\mathbf{F_в / F_н = 2}$. Інтервал між будь-якими двома частотами $\mathbf{F_п}$ і $\mathbf{F_0}$ в октавах дорівнює

$$n = \log_2(\mathbf{F}_п/\mathbf{F}_0) = 3{,}33\lg(\mathbf{F}_п/\mathbf{F}_0) \quad (2.7)$$

Якщо границями діапазону чутних звуків вважати $\mathbf{F_0}$ = 20 Гц і $\mathbf{F_в}$ =20 кГц, то одержимо, що чутні звуки займають приблизно 10 октав.

У музиці використовуються частотні інтервали, починаючи з півтону. Півтон дорівнює 1/12 октави й відповідає зміні частоти в 1,054 рази (корінь 12-ої ступені із двох), тобто, на 5,4%. Кожний півтон ділиться на 100 центів. Частоти напівтонових інтервалів відрізняються на корінь 12- ої степені з 2 (1,0595 рази), тобто приблизно на 6 %.

Однак, проведені недавно дослідження показали, що область придатності логарифмічного закону (2.2), де сприйняття висоти тону пропорційно логарифму зміни частоти звуку, обмежується третьою октавою (**F**=1048 Гц). Вище цієї частоти мелодійні октави (що сприймаються на слух) вже не співпадають з гармонічними, обчисленими по (2.2).

Крутість підйому або спаду частотної характеристики виражають у децибелах на октаву, смугу пропускання фільтрів - в октавах або частках октави. В октавних фільтрів відношення граничних частот $\mathbf{F_в / F_н}$дорівнює 2, у напівоктавних $\mathbf{F_в / F_н}$ дорівнює $\sqrt{2}$ (або 1,41), у третьоктавних (інакше – терцієвних) $\mathbf{F_в / F_н}$= 1,26.

Звернемо увагу, що теоретична (розрахункова) музична шкала (інакше – музична будова) відноситься не до відчуттів, а до стимулів (подразників) і означає перехід від одного способу позначення частоти коливань до іншого, прийнятому в музиці.

Таким чином, у психоакустиці й у музичній акустиці тим самим терміном (октавою) описують *різні поняття*.

4.2 Критичні смуги слуху

Критичні смуги слуху використовуються як *одиниця суб'єктивної висоти тону*, що назвали барк (на честь Баркгаузена, який першим займався вимірами сили звуку). 1 барк = 100 мел. В області частот вище 500Гц частота коливань стимулу (у Гц) і висота тону (у барк) зв'язані логарифмічною залежністю й пропорційні один одному. Збільшення будь-якої частоти на частотну групу призводить до зростання висоти тону на один барк (або 100 мел).

У критичних смугах звуку ***закладена інформація про повільні зміни висоти тону й гучності.***Ці процеси утворюють бічні модуляційні смуги при спектральних компонентах звуку. У діапазоні частот від 20 Гц до 16 кГц число критичних смуг дорівнює 24.

Використання шкали висоти тону в барках, виявилося зручним при розрахунках коефіцієнтів маскування звуку шумами, оскільки шкалою висоти тону в барках враховується специфічний ефект – ***ефект маскування*** (він розглянутий нижче). Ефект маскування у свою чергу *враховується при*

*субсмуговому кодуванні в цифрових системах мовлення****для скорочення швидкості цифрових потоків по каналах передачі.***

Отже, висоту тонів у барках можна визначати шляхом виміру порога чутності при маскуванні по частотних групах (критичним смугам).

Графік переходу від частотної шкали в октавах до шкали висоти тону в **барках H(F)** представлений на рис. 2.10.

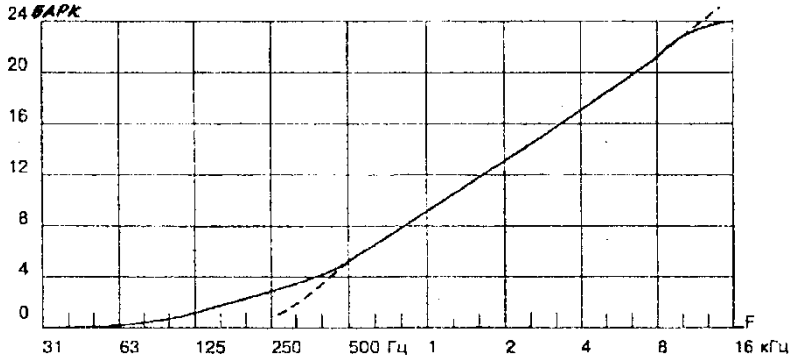


Рис. 2.10. Графік переходу від частотної шкали в октавах до шкали висоти тону в барках

Для усунення неоднозначності розташування критичних смуг на частотній осі стандартами MPEG встановлені наступні ***нижні межі***критичних смуг слуху: 20, 100, 200, 300, 400, 510, 630, 770, 920, 1080, 1270, 1480. 1720, 2000,2320, 2700, 3150, 3700, 4440. 5300, 6400, 7700, 9500, 12000, 16000 Гц.

Ширина цих смуг міняється від низьких частот до високих нерегулярним чином, рис. 2.11.

В області до 500 Гц ширина частотних груп майже не залежить від середньої частоти й дорівнює приблизно 100 Гц. В області вище 500 Гц вона збільшується пропорційно середній частоті: спостерігається не абсолютна, а відносна сталість ширини критичної смуги $\Delta F_{кр}/F_{ср} \approx 0{,}2$. Начастоті 20 кГц ширина критичної смуги дорівнює 5 кГц.

При розпізнанні ознак звукового образу слухова система віддає перевагу компонентам сигналу в частотних групах, утворених нею на околицях спектральних максимумів, оскільки спектральні компоненти сигналу усередині частотних груп найбільш інформативні.

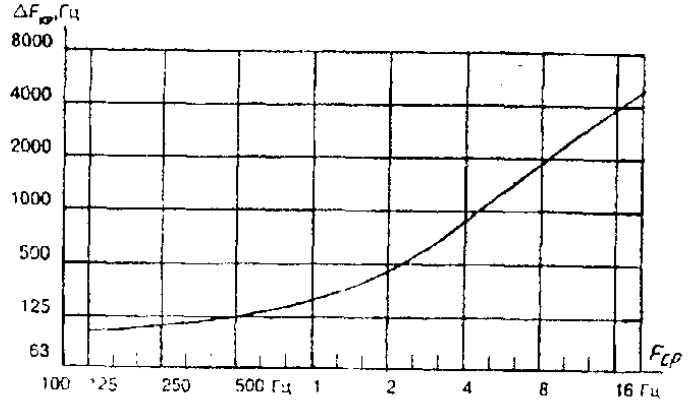


Рис. 2.11. Залежність ширини критичної смуги частот $\Delta F_{кр}$ слуху від середньої частоти Fcp

У межах частотних груп (смужок) слух інтегрує збудження по частоті й не розрізняє тонкої структури стимулу. Ця властивість слуху використовується при так званому **субсмуговому кодуванні звукових сигналів**.

При кодуванні стислого (з метою зниження швидкості передачі) цифрового звукового сигналу *замість самого сигналу можна передати номер смуги і рівень сигналу в даній критичній смузі*, а в пункті прийому програми відновити спектральні компоненти всередині частотної групи по прийнятих кодових ознаках сигналу.

Для передачі по мовних каналах не потрібно передавати всі *складові звуку* критичної смуги – **досить лише однієї максимальної складової спектру в даній смузі**. По цій же причині слух реагує не на загальну *потужність шуму*, а тільки на потужність шуму в критичних смугах.

Таким чином, при дії широкосмугового шуму **слух як би перетворює суцільний спектр у дискретний**. Такий спектр складається з кінцевого числа складових по числу критичних смуг органа слуху. Величини цих складових можуть бути знайдені гармонічним аналізом коливання (швидке перетворення Фур'є – ШПФ або дискретне косинусне перетворення - ДКП).

Якщо ширина спектру вузькосмугового шуму менше ширини критичної смуги слуху, то *рівень гучності в цій смузі визначається лише загальною енергією шуму й зовсім не залежить від характеру розподілу інтенсивності звуку, який сприймається в смузі*. Вона може бути розподілена рівномірно або зосереджена в частині смуги або бути **у вигляді одного тону.**

4.3 Рівень гучності звуку

Звуковий тиск і інтенсивність тонального звуку, виміряні приладами (об'єктивні характеристики звуків), не дають уявлення про *відчуття гучності*. Але людина може досить точно встановити *рівність гучності двох звуків будь-якого частотного складу*. Ця властивість слуху й була використана для введення поняття ***рівня гучності***, *що дозволяє визначити гучність одного звуку відносно іншого, прийнятого в якості опорного*.

На рис. 2.12 представлені стандартизовані криві рівного *рівня гучності* (***ізофони***) для прослуховування чистих тонів через гучномовець двома вухами. За одиницю рівня гучності (*1 фон*) прийнята величина рівня інтенсивності чистого тону із частотою 1000 Гц. *Чисельно рівень гучності у фонах дорівнює рівню інтенсивності звуку в децибелах на частоті 1 кГц.*

За нуль децибелів рівня поля на графіку ізофон прийнято діюче значення звукового тиску $\mathbf{p}_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па, (інтенсивність звуку $\mathbf{I_0 = 10^{-12}}$ **Вт/см^2**). З цього порогу починається відчуття гучності. Числа $\mathbf{p_o}$ й $\mathbf{I_0}$*називають стандартним порогом чутності при частоті* 1000 Гц (відповідно по звуковому тиску й інтенсивності звуку), на відміну від середньостатистичного значення порога чутності, що трохи перевищує стандартне й до того ж залежить від умов експерименту.

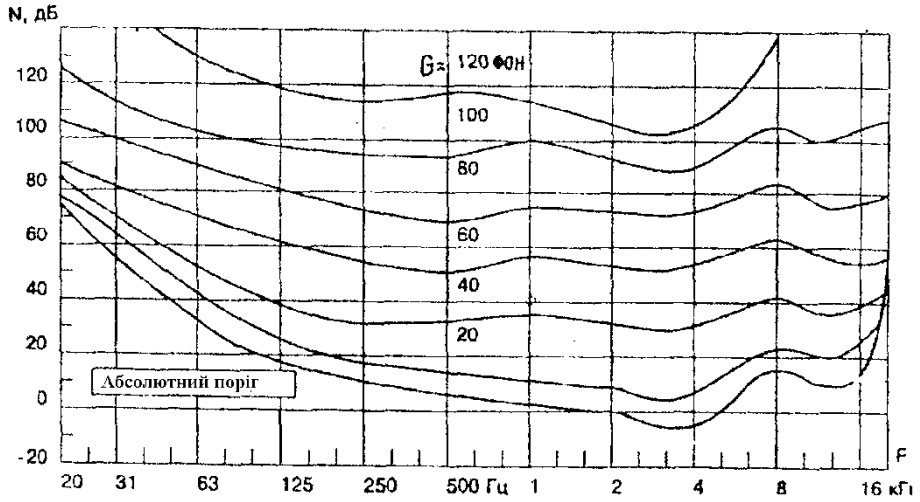


Рис. 2.12. Стандартні криві рівного рівня гучності (G)*(ізофони)*

Кожна ізофона являє собою безліч точок з координатами **(N_i ; F_i),** що задовольняють умові *рівної гучності* з опорним тоном 1000 Гц.

Таким чином, *сімейство ізофон можна розглядати як сукупність частотних характеристик слухової системи людини, виміряних "по виходу".* При подібних вимірах величина вихідного сигналу (у цьому випадку - гучність) підтримується постійною, а ***реєструється частотна залежність величини вхідного сигналу*** (подразника). Параметром ізофон служить **психоакустична** (ще раз відзначимо - не фізична !) величина – **рівень гучності.**

По осі ординат на рис. 2.12 відкладені відносні акустичні рівні звукового тиску в децибелах (або рівні їм рівні інтенсивності звуку $N = 20\lg(\mathbf{p}_{зв}/\mathbf{p}_0) = 10\lg(\mathbf{I}_{зв}/\mathbf{I}_0)$). Зміна рівня на 1 дБ відповідає зміні інтенсивності звуку на 26 % і звукового тиску на 12%.

Для прикладу, максимальний рівень гучності при пострілі з гармати на близькій відстані – 140 фон, у кабіні літака на зльоті й на концерті важкого року – 125 ... 130 фон, рівень гучності крику в закритому приміщенні – 100 дБ, у поїзді метро – 85...90 фон, звичайна розмова – 60 дБ, рівень гучності в студії запису – 40 дБ, у бібліотеці 25 .. 30 дБ.

4.4 Гучність звуку

Крім поняття *рівень гучності* введено поняття ***гучність***. **Гучністю** називається суб'єктивне відчуття, яке дозволяє органу слуху розташовувати звуки по шкалі від тихих до гучних звуків. Відчуття гучності пов`язується з амплітудою (або потужністю, інтенсивністю) звукового коливання. *Зазвичай, чим більший звуковий тиск, тим гучніше звучить акустична система*. Проте, цей тезис не завжди справедливий.

Крім амплітуди, гучність залежить від частоти коливання (чутливість слуху до сприйняття звуку максимальна орієнтовно в інтервалі від 500 Гц до

5000 Гц; на частотах за межами цього інтервалу чутливість зменшується), *спектрального складу, тривалості звуку і його локалізації в просторі*. Відмітимо, що в літературі замість терміна гучність використовуються і його синоніми – **абсолютна гучність, відносна гучність** і **суб'єктивна гучність**.

Необхідність введення поняття гучності*зв'язана з тим, що на практиці часто цікавить не рівень гучності, а величина, яка показує у скільки раз даний звук гучніший за інший*.

Фон як одиниця рівня гучності незручний тим, що, знаючи число тонів (наприклад, для двох синусоїдальних сигналів різної частоти з рівнем 50 фон кожен) не можна простим їх додаванням знайти результуючу гучність (не можна стверджувати, що двотональний сигнал буде мати рівень 100 фон). *Умові адитивності (правомірності додавання) відповідає одиниця гучності* – **сон**.

Зв'язок між рівнем гучності **L** в фонах і гучністю **G** в сонах представлений на рис.2.13.

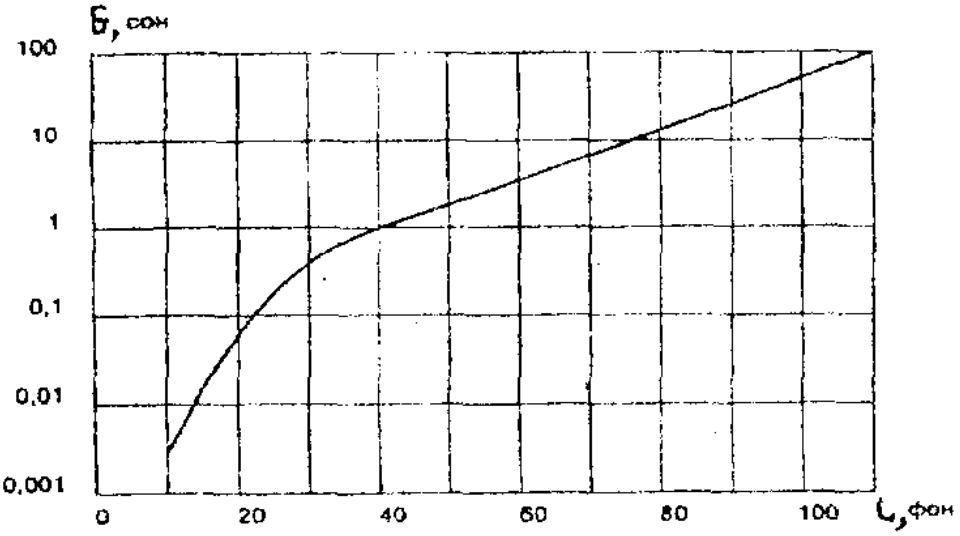


Рис. 2.13. Залежність гучності тонального звуку від його рівня гучності

Для однаковості акустичних розрахунків залежність **G(L)**, так як і ізофони, стандартизована на міжнародному рівні. Функція **G(L)** при 40 ≤**L**≤120 описується співвідношенням

$$G=2^{(L-40)/10} \quad (2.8)$$

За допомогою цієї формули графік кривих однакового рівня гучності (рис. 2.13) може бути перерахований у графік кривих рівної гучності.

Для прикладу, максимальна гучність звуку в кабіні літака 600…800 сон, гучність шуму в метро – 30…45 сон, гучність звичайної розмови – 3…5 сон, гучність шуму в бібліотеці – 0,2…0,4 сон.

Для частоти 1000 Гц, при якій число фонів співпадає з числом децибел, ця формула має вигляд $G_{1000}=42\ p_{зв}^{0,6}=256\ I_{зв}^{0,3}$. Тут **G**вимірюється в сонах, $p_{зв}$ – в паскалях, $I_{зв}$ – в Вт/м^2. Степенева залежність $G(p_{зв})$ або $G(I_{зв})$ називається законом Стівенсона.

Із цього закону слідує, що в середній частині звукового діапазону частот гучність пропорційна звуковому тиску або напрузі в електричній частині звукового тракту в степені 0,6 або інтенсивності звуку (або електричній потужності сигналу на вході гучномовця) в степені 0,3. *При наближеній оцінці вважають, що гучність пропорціональна кубічному корню із потужності* (!). У випадку широкосмугового шуму при великих рівнях звукового тиску гучність шуму значно перевищує гучність тону. Так, для тону 1 кГц при рівні звукового тиску 60 дБ його гучність складає 4 сона, а гучність широкосмугового шуму з таким же рівнем тиску майже в 4 рази більша і складає 15 сон.

При малих рівнях звукового тиску (біля 15 дБ) гучності тону і широкосмугового шуму практично однакові і рівні 0,06 сон. При ще менших звукових тисках гучність широкосмугового шуму стає меншою від гучності тону.

Найбільш повно частотні і висотні властивості вуха ілюструються кривими на рис.2.17.

Тут об'єднані криві попередніх рисунків. Вхідний і вихідний сигнали представлені в своїх природних параметрах: вхідний – в фізичних (рівень інтенсивності і частота), а вихідний – в психоакустичних (гучність і висота тону).

4.5 Тембр як психоакустичний параметр слуху

Найбільш чітким (якщо можна так заявити) є наступна характеристика тембра: ***тембром з****вуку називається його особливе забарвлення, яка дозволяє відрізнити даний звук від інших звуків такої ж висоти і гучності.*

Воно включає всі ознаки звукового образу, крім гучності, тривалості і висоти тона. Саме цим і пояснюється той факт, що спеціалісти різних професій (музиканти, звукорежисери, інженери-звукотехніки) вкладають в це поняття різний зміст і описують його в різних термінах.

Так, **якість звукової апаратури і каналів звукового мовлення** визначається тим, наскільки вірно передаються ними тембральні характеристики звукових сигналів: *чи не проявляються сторонні призвуки і хрипи, чи зберігається дзвінкість, об'ємність і повнота звучання.*

Хоча строгі визначення гаданих термінів (через які робиться спроба чіткіше визначити термін «тембр») відсутні, від такого опису тембру зручно переходити до спотворень звукових сигналів (частотних, фазових, перехідних, нелінійних) і технічних показників звукової апаратури.

В музичній акустиці *тембр звучання*голосів і інструментів описують інакше: *говорять про склад обертонів, атаку і загасання звуку, модуляціях (вібрато і тремоло).* Від такого опису тембру зручно переходити до особливостей побудови музичних інструментів і прийомів витягування звуку.

Музичні звуки є відрізками періодичних коливань, спектр яких дискретний і містить крім основного тону ряд ***обертонів*** (гармонік основного тону).

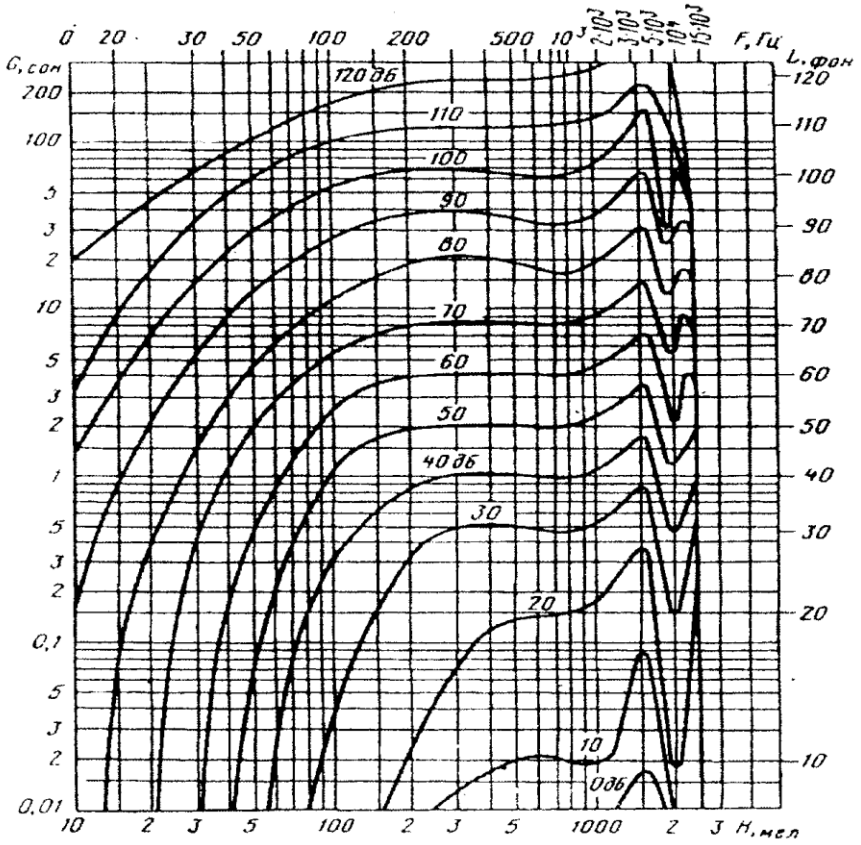


Рис. 2.17. Частотні характеристики слухового аналізатора

Кількість обертоніві співвідношення їх амплітуд є найбільш важливим фактором, що визначає тембр звуку. *Встановлено, що обертони вище восьмого не покращують тембр*. Перевантаженість обертонами створює відчуття тяжкості звучання. *Надмірна бідність обертонів в складі звуку приводить до безбарвності тембру.*

Другим фізичним фактором, що визначає тембр, є ***тривалість атаки*** (наростання) звуку і тривалість його загасання. При цьому обертони і основний тон можуть мати різні тривалості атаки і затухання. Звук фортепіано характеризується короткою атакою і довгим затуханням, тоді як у органа – навпаки. Тому тембри цих інструментів різні.

Суттєвий вплив на тембр звуку має ***вібрато.*** Цим терміном позначається невелика амплітудна або частотна модуляція основного тону звука або його обертонів, що відбувається з частотою не вище 10…12 Гц. В звичайних (не електронних) інструментах така модуляція здійснюється, наприклад, механічними коливаннями пальця, що притискає струну. В електронних інструментах передбачаються спеціальні генератори вібрато.

Співзвуччя. Цікаві особливості тембру виникають при одночасному відтворені цілої групи звуків, наприклад, одночасне відтворення декількома музичними інструментами звуків однієї й тієї ж частоти. Повна тотожність звуків усіх інструментів не досягається, оскільки:

- не можна відтворити звук однієї й тієї ж висоти з абсолютною точністю, в результаті чого маємо розкид по частоті, тобто відтворюється не одна частота, а вузька група частот;
- не можна здійснити повну синхронність атаки і загасання, тому виникає часова зона звучання;
- музичні інструменти неідеальні по тембрах.

При співзвуччях створюється густота і м'якістьтембру. Відмітимо, що дати чітке визначення «густоти» і «м'якості» доволі складно. Музикантам їх чіткого визначення і не потрібно.

Існують і інші набори термінів для визначення поняття «тембр».

5. Основні властивості слухової системи людини

5.1. Пороги чутності й динамічний діапазон слуху

Поріг чутності – це мінімальний звуковий тиск, при якому ще існує слухове відчуття. Він характеризує чутливість вуха до інтенсивності звукової енергії. Величина порога чутності залежить від характеру звукових коливань і умов вимірів, які використовуються.

Поріг чутності називається ***абсолютним*** при вимірі його на тональному звуці в повній тиші. Він визначається для слухачів віку 18...20 років при розміщенні джерела звуку перед слухачем. Тривалість впливу звуку повинна бути не менш 250 мс. Графік частотної залежності рівня абсолютного порога чутності наведений на рис. 2.18.

По осі абсцис відкладена частота випробувального тону, а по осях ординат – звуковий тиск у паскалях (Па) і рівень звукового тиску в дБ.

Найбільша чутливість слуху на частотах 2...5кГц. На цих частотах абсолютний поріг чутності менше $2 \cdot 10^{-5}$ Па, тобто нижче нульового рівня.

Відмітимо, що звуковий тиск, який виникає внаслідок броунівського руху молекул повітря при температурі 25 °С, становить $5 \cdot 10^{-6}$ Па. Якби вухо було вдвічі чутливіше, воно чуло б безперервний шум флуктуацій молекул повітря й струму крові: людина прокидалася б уночі від звуку хаотичного руху молекул у навколишньому середовищі повітря. Таким чином, *чутливість вуха перебуває на межі біологічної доцільності*. Самий тихий звук, що людина здатна чути, відповідає зсуву барабанної перетинки менше ніж на діаметр атома водню.

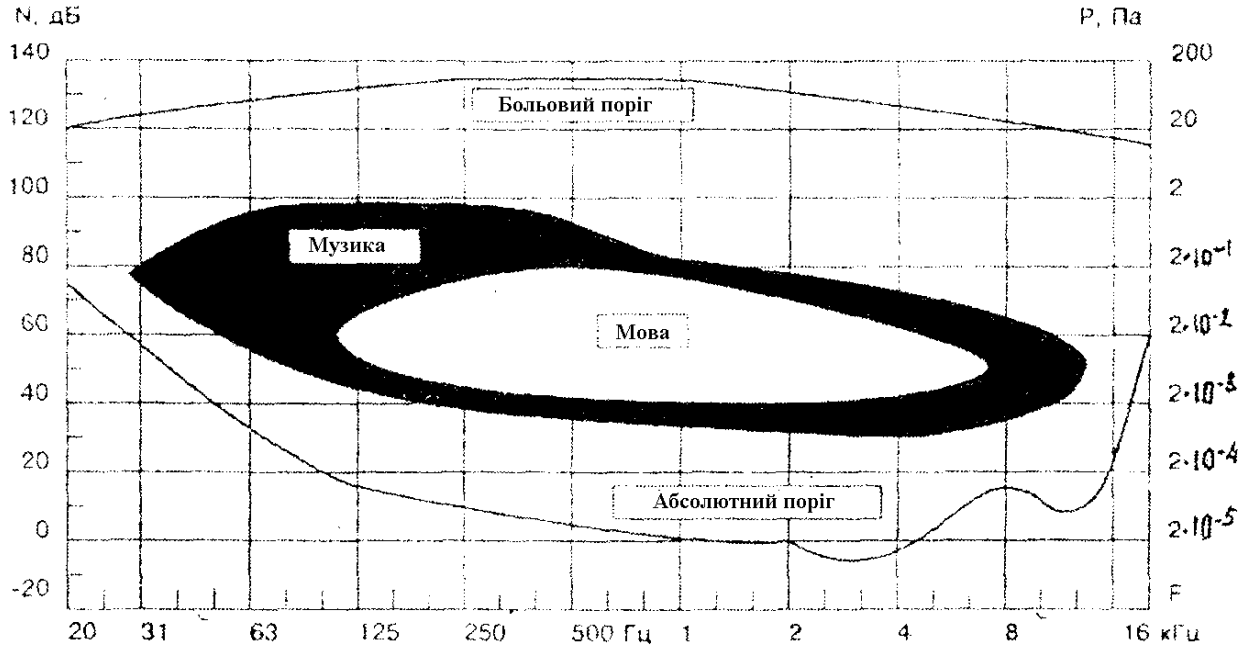


Рис. 2.18. Області чутності звуку

Пороги чутності для лівого й правого вуха різні. Тому результати вимірів залежать від того, що використовується при вимірах (гучномовець або головні телефони).

При використанні телефонів абсолютний поріг чутності вище на 5...10 дБ.

З віком слух людей притупляється, особливо на високих частотах. Звичайно начастоті 10 кГц чутливість вуха в 60-річної людини на 20 дБ нижче, ніж в 20-літньої.

При звуковому тиску 60...80 Па виникає відчуття "тиску на вуха". Ця величина називається ***порогом дотику***.

При рівні тиску близько 100 дБ виникають неприємні відчуття. Тиск 150 ... 200 Па заподіює біль і називається ***больовим порогом***.

Різниця рівнів порога чутності й порога больового відчуття називається ***динамічним діапазоном слуху***. Зрозуміло, що динамічний діапазон мовних звуків не повинен перевищувати динамічний діапазон *слуху.*

Слухова система людини пристосована до звуків малої й середньої інтенсивності з рівнем тиску не вище 90 дБ. Звуки з рівнем тиску більше 75 дБ призводять до зміни порогів чутності й навіть до повної глухоти. Ступінь ушкодження слуху пропорційна часу впливу.

Якщо звуковий стимул діє протягом декількох годин, виникає слухове стомлення, зниження слуху, що довгостроково не відновлюється . Іноді поріг чутливості відновлюється через 16...20 годин.

Якщо ж орган слуху піддається утомливій дії звуку систематично протягом тривалого часу (місяці, роки), повного відновлення слухової чутливості не відбувається, оскільки виникають глибокі необоротні зміни в нервових клітинах внутрішнього вуха. *Найбільший вплив на зрушення порогу чутливості роблять високі частоти*. Зниження чутливості слуху із цих причин **лікуванню не піддається**. Дослідження показали, що в останні роки різко знизилася

слухова чутливість у деяких груп молоді, що пов'язано з образом їхнього музичного життя.

Області чутності музики й мови розташовуються між кривими абсолютного порога й порога больового відчуття. *У смузі частот мови* (від 100 до 7000 Гц) ***діапазон тисків становить*** від 40 до 84 дБ. *У смузі частот музики* (від 31 до 15000 Гц) **діапазон тисків від 35 до 100 дБ**. У цій області чутливість вуха на граничних частотах знижується на 60...80 дБ. Тому *зовсім даремно передавати складові спектру нижче порога чутності*. Оскільки цей поріг істотно залежить від частоти, то в *цифровому мовленні доцільно робити кодування в частотній області з використанням алгоритмів субсмугової фільтрації*, що згадувалася.

Хоча діапазон чутних звуків становить120 ... 130 дБ, *рівень звукового тиску для музичних програм не перевищує* **100 дБ**, *а для мови* – **84 дБ** (до того ж – цей діапазон залежить від частоти). Тому при аналогово-цифровому перетворенні звукових сигналів варто враховувати можливість зниження розрядності кодових слів різних мовних програм (і залежно від частотної смуги; наприклад, *доцільно мати перемикання мова/музика, що дозволить істотно скоротити швидкість цифрових потоків при передачі мови*).

Зміна інтенсивності звуку викликає зміну гучності лише тоді, коли інтенсивність перевищить деяку величину, яка називається ***порогом розрізнення інтенсивності.*** При невеликій гучності величина згаданого порогу дорівнює 2...3 дБ, а з підвищенням гучності величина порогу зменшується до 0,4 дБ. Загальне **число градацій звуку**, що розрізняє вухо, на низьких і середніх частотах становить близько **150**, а на середніх і високих частотах – близько **250.**

У межах десятикратної зміни інтенсивності звуку (1 бел) на частоті 1000 Гц людина розрізняє приблизно 10 градацій гучності, тобто зміна рівня інтенсивності звуку на 1 дБ лежить на порозі розрізнення.

Помітимо, що з рис. 2.12 можна зробити корисні висновки для регулювання рівня гучності.

Дійсно, кожна крива показує, яким чином зі зміною частоти повинен змінюватися рівень інтенсивності звуку, щоб гучність синусоїдальних сигналів залишалася постійної. При зміні рівня інтенсивності на низьких частотах рівень гучності змінюється сильніше, ніж на середніх і високих частотах. *Отже, частотно-незалежне регулювання рівня звуковідтворюючих пристроях призводить до більш різкої зміни низькочастотних складових сигналу, тобто перекручування тембру сигналу*. Саме тому у високоякісних звуковідтворюючих пристрояхрекомен-дується застосовувати ***тон-компенсовані регулятори рівня***. Для збереження тембру при регулюванні рівня звуковідтворення при зменшенні підсилення здійснюється підйом в області низьких частот.

Додамо до цього, що *при вимірах різного роду акустичних шумів і завад* також доцільно враховувати розглянуті особливості слухового сприйняття. Так, у **шумомірах** при оцінці шуму у виробничих приміщеннях (при вимірі

відношення сигнал/шум з урахуванням чутності низьких частот) для цієї мети використовуються три види «фільтрів, що зважують» як це робить слухова система. Фільтри мають різні амплітудно-частотні характеристики – A, B и C, рис. 2.19.

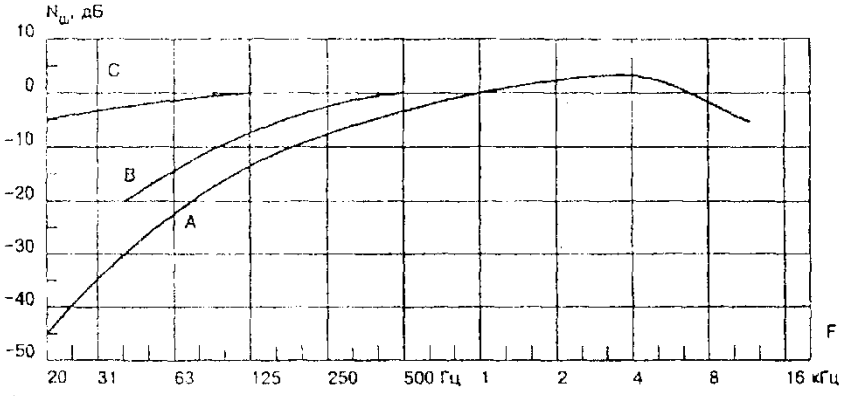


Рис. 2.19. Амплітудно-частотні характеристики фільтрів, що зважують, для виміру рівня гучності широкосмугового шуму

Характеристика A застосовується для *виміру шумів з рівнем гучності 20...55 фон* (вона має спад – 30 дБ на частоті 50 Гц стосовно рівня на частоті 1000 Гц). *Крива B – з рівнем 55...85 фон має спад – 12 дБ на частоті 50 Гц. Крива C (прямолінійна) – з рівнем вище 85 фон – має спад усього -2 дБ на частоті 50 Гц.* Характеристики A і B *обернені ізофонам*, рівним відповідно *30* і *70* фон, а C – ізофоні 100 дБ (дуже високий рівень). Якщо ці криві перевернути знизу нагору, то одержимо відповідні ділянки ізофон (рис. 2.12).

Ще раз звернемо увагу, що криві на рис. 2.12 зняті при випробовувальному тональному сигналі.

Крива порога чутності може бути знята з використанням вузькосмугового шуму й співзвучностей. **Особливу цікавість представляє поріг чутності шуму з рівномірною спектральною щільністю у всьому звуковому діапазоні частот**. Він дорівнює **+12дБ**. *До такого шуму наближаються помилки квантування в цифрових звукових трактах. Вони значною мірою визначають якість звучання.*

Поведінка кривих рівного рівня гучності істотно змінюється, якщо як звук, що випробовується, використовувати смуги шуму шириною $\Delta F_ш$ (на відміну від випробовувальних тональних сигналів для рис. 2.12).

Для ілюстрації на рис.2.20 по осі ординат відкладений рівень інтенсивності шуму $\mathbf{N_ш}$ в смузі, при якій досягається відчуття однієї й тієї ж гучності, а по осі абсцис – ширина смуги шуму $\Delta F_ш$, що випробовується (центральна частота смуги шуму дорівнює 1 кГц; для неї критична смуга шуму дорівнює 160 Гц). Видно, **що в критичній смузі рівень гучності шуму не залежить від його смуги**. Він повністю визначається рівнем інтенсивності шуму $\mathbf{N_ш}$.

При збільшенні смуги шуму вище критичної для забезпечення сталості рівня гучності необхідно зменшувати рівень шуму приблизно на 3 дБ при кожному подвоєнні смуги шуму.

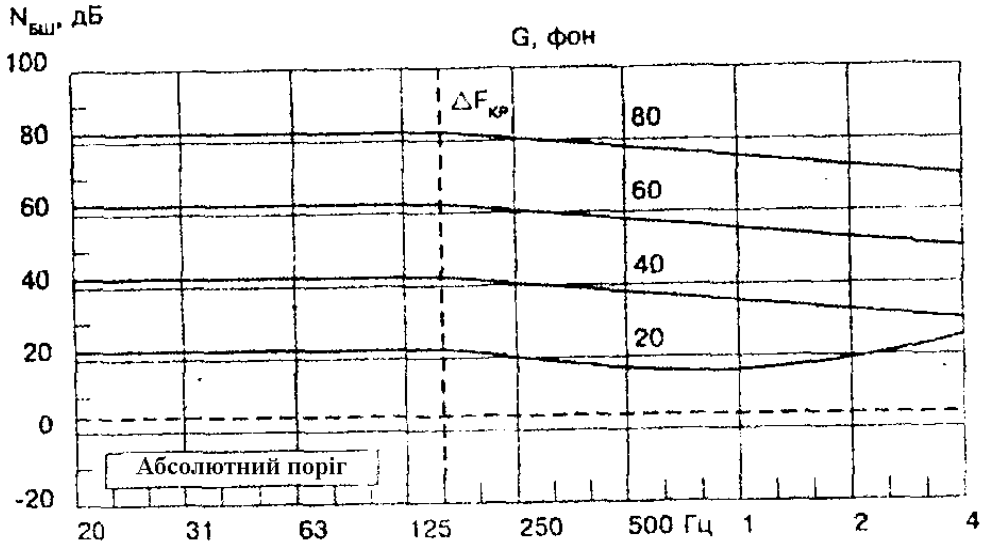


Рис. 2.20 Криві рівного рівня гучності шуму з смугою $\Delta F_{ш}$ (з середньою частотою смуги шуму 1 кГц)

5.2. Частотне маскування звуків

При одночасній взаємодії на слух двох звуків один із них може не прослуховуватись на фоні іншого звуку. Цей ефект і називається ***маскуванням***. Він добре знайомий із повсякденного життя і, наприклад, пояснює чому людина не чує чийсь шепіт, коли хтось одночасно поряд кричить. Нейрони збуджуються більш сильною дією звуку «з чужою частотою», хоч вони повинні реагувати на коливання своєї частоти.

Маскувальна дія різних звуків *виявляється шляхом визначення підвищення рівня порогу чутності* **($N_{пс}$)** випробних тонів або вузькосмугових відносно абсолютного порогу чутності **($N_{апс}$)**.

Коефіцієнт маскування ($К_м$) обчислюється як різниця цих рівнів в дБ:

$$К_м = N_{пс} - N_{апс}. \qquad (2.9)$$

Маскування чистим тоном. На рис 2.21 для ілюстрації наведені криві зміни порогу чутності **($N_{пс}$)**тону з частотою $F_м$**=1 кГц** і різними рівнями $N_м$ (в дБ).По аналогічних кривих визначається поріг чутності на конкретних частотах тону, який маскується, і розраховується коефіцієнт маскування.

Особливості маскування чистим тоном такі:

- маскування максимальне, коли частоти $F_т$і $F_м$ близькі; чим далі по частоті вони розміщені одна від одної, тим менша величина (різниця порогів чутності) маскування;
- величина маскування збільшується по мірі зростання рівня тону$N_м$, що заважає;
- криві маскування суттєво несиметричні по шкалі частот; у них більш різкий спад в сторону нижніх частот і плавне зниження в сторону верхніх частот;

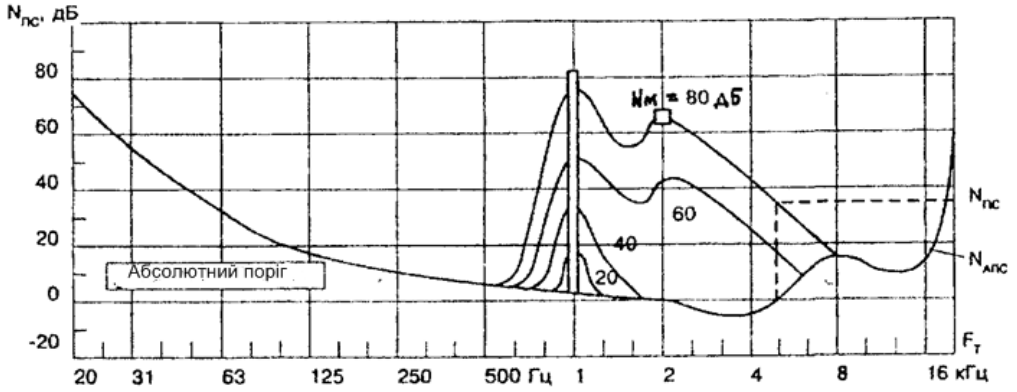


Рис. 2.21. Криві порогу чутності тону з частотою $F_т$ при маскуванні тоном з частотою $F_м$=1 кГц і рівнем $N_м$ (в дБ)

зсув маскувального тону по частоті приводить до зміни форми кривої маскування.

Якщо частота тону $\mathbf{F_т}$ рівна подвійній (потрійній і т.д.) частоті тону $\mathbf{F_м}$, що заважає, то в широкому діапазоні чутності виникають биття (із-за нелінійності слуху, див. нижче), що породжує сплески порогу чутності і збільшення коефіцієнта маскування. На рис. 2.21 показано сплеск на частоті $\mathbf{2F_м}$=2 кГц при рівні тону, що заважає $\mathbf{N_м}$=80 дБ. Ці биття тим помітніші, чим більший рівень тону, що заважає.

Маскування декількома тонами. Якщо маскування здійснюється відразу декількома тонами (співзвуччям), то крива порогу чутності у всьому частотному діапазоні співзвуччя лежить вище абсолютного порогу чутності. В цьому випадку криві порогу чутності мають множину максимумів (зон биттів). Прималій гучності високий тон добре чутний одночасно з низьким тоном. При високій гучності високі частоти можуть повністю маскуватись низькими.

Маскування вузькосмуговим шумом. При маскуванні тону з частотою $\mathbf{F_т}$ вузькосмуговим шумом з центральною частотою $\mathbf{F_м}$ і рівнем інтенсивності $\mathbf{N_м}$ криві маскування приблизно такі ж, як при маскуванні тоном з деякими відмінностями:

- відсутні биття на гармоніках маскувального сигналу і сплески коефіцієнту маскування;
- максимум маскування нижче від максимуму рівня інтенсивності шуму, що заважає, на 4 дБ, рис. 2.22.

Видно, що для тональних звуків вище 1 кГц маскувальна дія шуму значніша, тоді як частоти на октаву нижчі від частоти $\mathbf{F_м}$ не маскуються. Даний момент важливо відмітити, оскільки при дискретизації аналогового звукового сигналу часто виникають спотворення нижче спектру основного тону, які не маскуються (і, звичайно, знижують якість дискретизованого сигналу).

Графіки, подібні зображеним на рис.2.22, дозволяють розрахувати допустиме відношення сигнал/шум квантування з урахуванням маскування.

Дійсно, вузькосмуговий шум маскує не лише тони, але і широкосмугові шуми квантування. Для маскувальних звуків великого рівня (наприклад, 100 дБ) область максимальної чутливості до шумів квантування зміщається в

інтервал 200…400 Гц, і при цьому поріг чутності при маскуванні на 20 дБ вищий від порогу чутності в тиші. В цьому діапазоні критичні смуги слуху в 10 разів вужчі від критичних смуг в області частот 2…5 кГц. Тому для шуму квантування з рівномірною спектральною густиною допустиме збільшення рівня шуму в такій смузі складе 10 дБ. В результаті поріг чутності шуму збільшиться на 30 дБ.

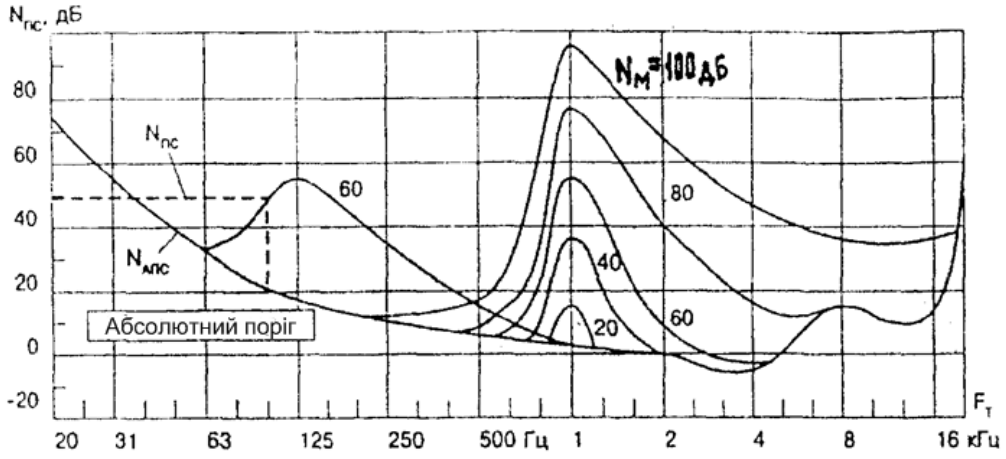


Рис. 2.22. Криві порогу чутності з частотою $F_т$ при маскуванні вузькосмуговим шумом з центральною частотою $F_м$=1 кГц і рівнем $N_м$ (в дБ)

Якщо врахувати, що пороговий рівень чутності шуму в тиші рівний +12 дБ, то допустиме значення рівня шуму квантування складе 42 дБ, а допустиме відношення сигнал/шум квантування 100 – 42 = 58 дБ. Тому величина відношення сигнал/шум, рівна 60 дБ, є нормою при цифровій передачі вузькосмугових сигналів в широкосмугових трактах.

Наприклад, на частоті тону 9 кГц п’ять гармонік (5х9=45) утворюють з частотою дискретизації 44,1 кГц (яка використовується при записі на компакт-диск) паразитну складову в звуковому спектрі (її частота буде рівна 45 – 44,1 = 0,9 кГц).

Маскування шуму квантування тональними звуками і вузькосмуговими шумами *має дуже велике значення при кодуванні звуку після процедури квантування*, оскільки *передавати складові спектру, які маскуються, не потрібно* (вони вухом не сприймаються), як наслідок, ***скорочується надлишковість в звукових сигналах***. *За рахунок цього* ***можна зменшити необхідне число розрядів цифрового сигналу*** *і швидкість цифрового потоку, заощаджуючи частотний ресурс системи мовлення.*

Зсув частоти маскувального звуку приводить до зсуву кривої маскування по осі частот. В області частот вище 1 кГц крива маскування змінюється мало, а на частоті нижче 1 кГц значно суттєвіше. Особливо важливо, що вона розширюється в область низьких частот.

Маскування широкосмуговим білим шумом.При маскуванні тону білим шумом криві маскування виглядають інакше, рис. 2.23.

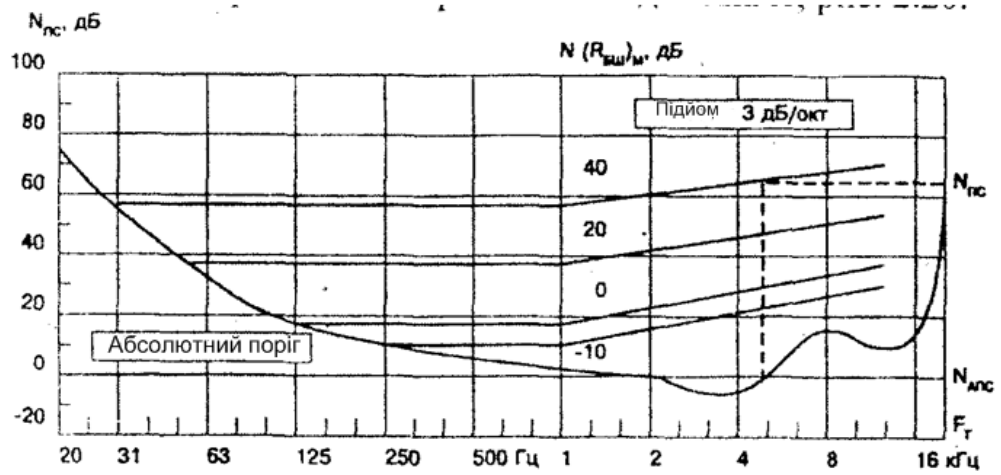


Рис. 2.23. Криві порогу чутності тону з частотою $F_т$ при маскуванні білим шумом з рівнем спектральної густини $N_{мбш}$ (в дБ)

Особливості такі:

- замість рівня інтенсивності для характеристики потужності шуму використовується рівень спектральної густини потужності $\mathbf{N_{мбш}}$;
- до частоти 500 Гц криві маскування ідуть горизонтально;
- на частотах вище 500 Гц рівень порогу маскування підвищується зі швидкістю 3 дБ/октаву; при збільшенні частоти в 10 раз поріг чутності зростає на 10дБ.

Подібна залежність пояснюється тим, *що органи слуху реагують на потужність шуму в критичних смугах слуху (частотних групах)*. Нижче 500 Гц всі критичні смужки слуху мають однакову ширину, тому поріг чутності від частоти практично не залежить. В області частот, де ширина критичних смужок слуху пропорційна середній частоті, при збільшенні частоти в 10 раз поріг чутності зростає на 10 дБ.

При маскуванні шумом слух поділяє широкосмуговий шум на частотні групи (критичні смужки) і може розпізнати випробний тон з частотою $\mathbf{F_т}$*лише тоді, коли його рівень на декілька децибел нижче шуму, що заважає, в частотній групі, де знаходиться тон*. Наприклад, при $\mathbf{N_{мбш}}$=40 дБ на частоті $\mathbf{F_т}$=1 кГц поріг чутності тону рівний 58 дБ, а абсолютний поріг чутності – 3 дБ, тоді коефіцієнт маскування складе 55 дБ. На других частотах маскування буде іншим.

Рівномірно маскувальний шум.Шум, який здійснює однакове маскування у всьому частотному діапазоні, повинен мати до частоти 500 Гц спектральну густину потужності як у білого шуму. А вище 500 Гц спектральна густина потужності повинна зменшуватись пропорційно частоті, як у розового шуму. Такий шум і називається рівномірно маскувальним. Криві маскування розовим шумом представлені на рис. 2.24.

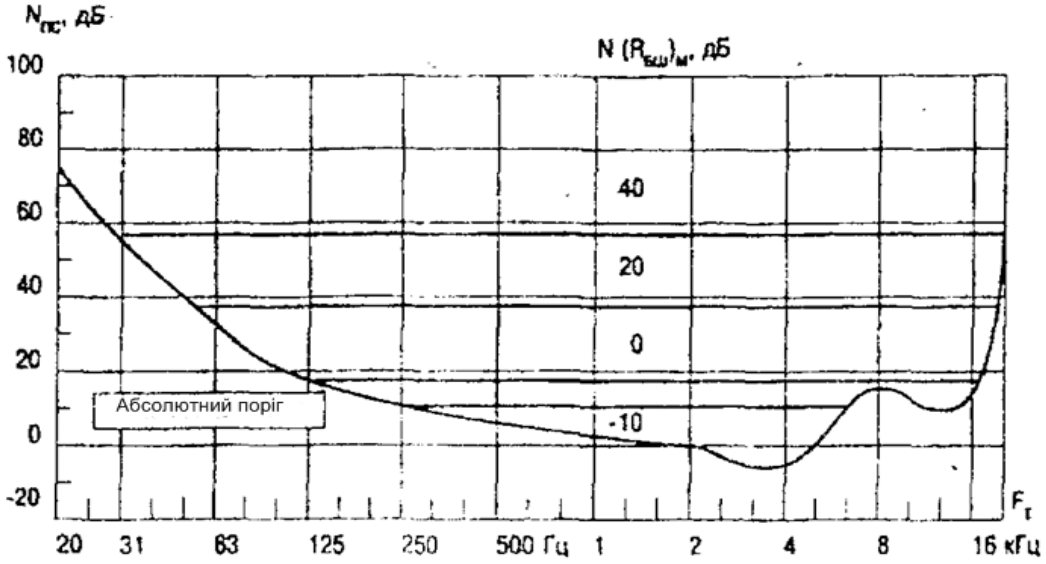


Рис. 2.24. Криві порогу чутності тону з частотою $F_т$ при рівномірно маскувальному шумі з рівнем спектральної густини $N_{мбш}$ (в дБ)

Розрахунок коефіцієнта маскування здійснюється так само як і при білому шумі.

Маскування тону шумом всередині критичної смуги. При такому маскуванні приймається, що ширина смуги білого шуму рівна ширині критичної смужки слуху, а тон, що маскується, знаходиться посередині цієї смуги. Для цього випадку коефіцієнт маскування визначається дещо по-іншому – як різниця між порогом чутності $\mathbf{N_{пс}}$ тону, що маскується, з частотою $\mathbf{F_т}$ і рівнем маскувального шуму $\mathbf{N_{мш}}$:

$$\Delta \mathbf{N_{мтш}}=\mathbf{N_{пс}}-\mathbf{N_{мш}}, \qquad (2.10)$$

де $\mathbf{N_{пс}}$ – рівень порогу чутності тону при маскуванні його шумом з рівнем $\mathbf{N_{мш}}$.

До частоти 500 Гц значення коефіцієнта маскування $\Delta \mathbf{N_{мтш}}$рівне мінус 2 дБ. Зі збільшенням ширини критичних смуг слуху (на частотах вище 500 Гц) його величина зменшується, досягаючи на самих верхніх частотах значення мінус 5…6 дБ.

Істотно гірше проявляється маскування в ситуації, *коли тон маскує шум*. Його ширина тут, як і раніше, рівна критичній смужці слуху. Коефіцієнт маскування визначається нерівністю:

$$\Delta\, \mathbf{N_{мтш}}= \mathbf{N_{псш}}- \mathbf{N_{мт}},$$

де $\mathbf{N_{псш}}- \mathbf{N_{мт}}$ – поріг чутності маскованого тоном шуму и рівень маскувального тону в дБ.

Величина коефіцієнта маскування змінюється від мінус 5…7 дБ на самих низьких частотах до значень 35…40 дБ на самих верхніх частотах.

Графіки маскування при використанні шкали висоти тону в барках. Криві порогу чутності при побудові кривих маскування *вшкалі частот* мають складну форму, яку тяжко апроксимувати (в цілях кількісної оцінки маскування).

При переході *від частотної шкали* до шкали *висоти тону* в барках ця задача вирішується значно простіше. *В цій шкалі форма кривих маскування не*

залежить від величини висоти маскувального тонуі повністю визначається лише рівнем його інтенсивності. Тому **в стандартах кодування MPEG величина маскування задається саме в шкалі висоти тону в барках**.

Для ілюстрації на рис. 2.25 наведені графіки маскування тону шумом (лінія 1) і шуму тоном (лінія 2) *всередині критичної смуги (частотної групи).*

Коефіцієнт маскування розраховувався з допомогою апроксимуючої функції – 1,525 – 0,175z – 0,5 (для лінії 1) і – 1,525 – 0,275z – 4,5 (для лінії 2). В обох випадках апроксимація передбачається лінійною. Тон залишається завжди чутним, навіть якщо його рівень менший від рівня маскувального звуку. Маскування шуму тоном (лінія 2) проявляється значно слабше.

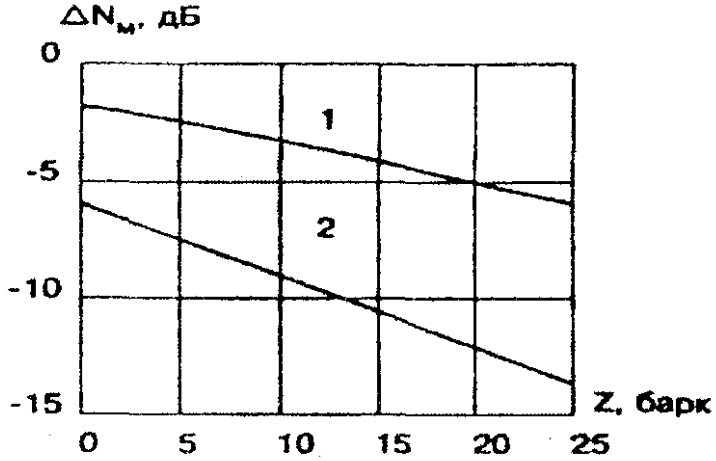


Рис. 2.25. Залежність коефіцієнта маскування всередині частотної групи від висоти тону в барках

На рис.2.26 наведені апроксимовані залежності маскування *поза критичною смугою слуху.*

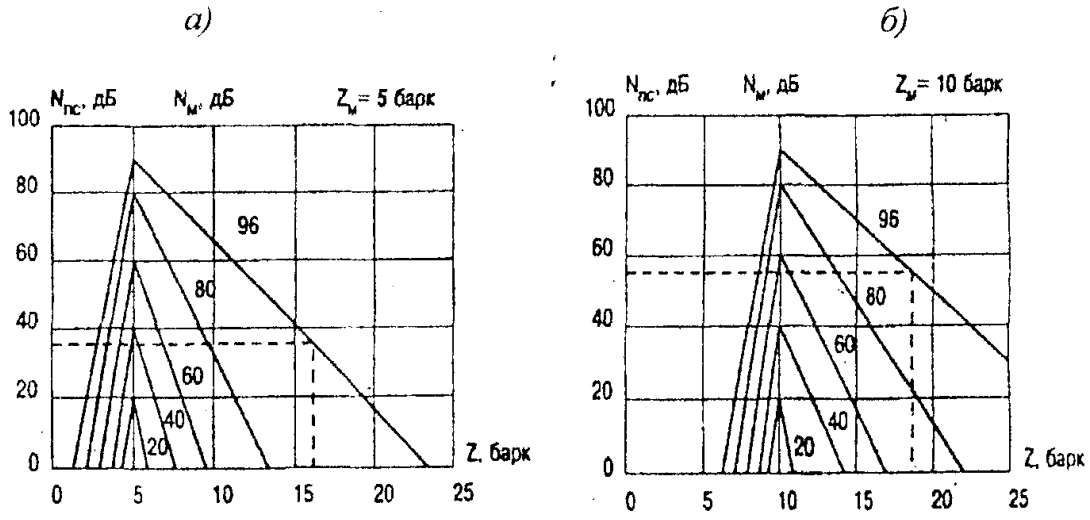


Рис. 2.26. Залежності порогу чутності тону з частотою F_T при маскуванні тоном (а) і вузькосмуговим шумом (б) від висоти тону в барках

В цьому випадку розглядається маскування складовими однієї смуги складових в інших критичних смугах. Під коефіцієнтом маскування розуміють рівень порогу чутності тону $\mathbf{N_{пс}}$ при заданих $\mathbf{N_м}$і **z**. Видно, що форма кривих

маскування *не залежить від висоти завадного тону***z**: сімейство залежностей лише переміщається по осі **z**при зміні **z**. Саме в цьому заключається перевага шкали висоти тону в барках.

5.3. Часові характеристики сприйняття звуку. Часове маскування звуку

Орган слуху володіє визначеною інерційністю при сприйнятті швидко наростаючих звуків. При зникненні звуку слухове відчуття зникає не відразу, а поступово, знижуючись до нуля.

Час, протягом якого відчуття по рівню гучності зменшується на 9…10 фон, ***називається постійною часу слуху.*** В середньому вона рівна 30…50 мс, але може досягати 150…200 мс.

Якщо до слухача приходить два коротких відрізки звуку, однакові по складу і рівню, але один із них запізнюється, *то вони будуть сприйматись злито, коли запізнення не перевищує* 50…60 мс. Звукові імпульси, що йдуть один за одним, *зливаються в одне звучання.*

За згаданий час відчуття від прямого сигналу незначно зменшується і копія, яка запізнюється, приймається як продовження попереднього (при миттєвому зникненні сигналу відчуття зменшилося б приблизно на 3 фона).

Звуки зливаються, якщо в часовому вікні шириною 100…150 мс знаходиться не менше двох звукових імпульсів.

При великих інтервалах запізнення обидва звукових імпульси сприймаються окремо. Наприклад, так поводять себе прямий і відбитий від стіни звуки: якщо час між ними більший від згаданого, то чується ***луна***. Вона проявляється, коли різниця ходу прямого і відбитого звуків більше ***18 м.***

Якщо рівень звуку, що запізнюється, набагато менший від першого, то він не буде прийнятий окремо, навіть якщо час запізнення більше 50 мс. В цьому проявляється ***ефект часового маскування*** – відчуття від першого звуку маскує (ховає) другий звук.

До часових характеристик слуху відноситься ***час встановлення висоти тону звуку.*** На низьких частотах час встановлення висоти тону складає біля 300 мс. На високих частотах він трохи менший. Наприклад, висота тону визначається слуховим апаратом приблизно за 5 періодівсигналу при будь-якій його частоті в діапазоні 100…1000 Гц і за 5 мс при більш високих частотах.

Адаптація слуху. При дії на барабанну перетинку вуха достатньо довготривалого звуку великої інтенсивності *гучність, що сприймається, поступово зменшується.* Це значить, що під час дії гучного довготривалого звуку *падає чутливість слуху.* Після припинення дії звуку чутливість слуху поступово відновлюється. Це явище називається *адаптацією слуху*, рис. 2.27.

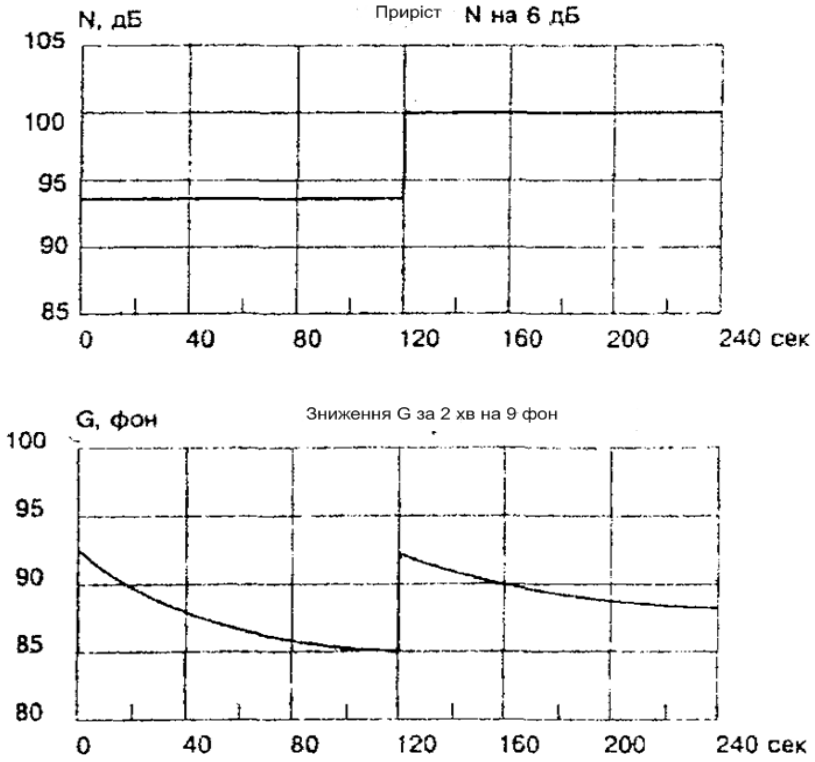


Рис. 2.27. Адаптація слуху при стрибкоподібному збільшенні звукового тиску

На рисунку показана дія імпульсів звукового тиску N тривалістю 2 хвилини. При рівні звукового тиску N = 94 дБ відбувається плавне зниження рівня гучності, що сприймається, з 94 до 85 фон.

Швидкість падіння рівня гучності в часі спочатку висока, потім зменшується майже до нуля. При подальшому стрибкоподібному зростанні звукового тиску на 6 дБ рівень гучності сигналу зростає на 9 фон, а потім знову починає зменшуватись. Проте, зменшення рівня гучності в цьому випадку помітно менше. Це означає, що ступінь адаптації (зниження чутливості) тим вище, чим гучніше стомливий звук.

На рис. 2.28 представлено зміну рівня гучності при стрибкоподібному зменшенні звукового тиску з 94 до 85 дБ.

При цьому стрибок зменшення гучності склав майже 20 фон. Потім відбувається адаптація слуху до тиші, і чутливість слуху частково відновлюється, а сприйнятий рівень гучності через 2 хвилини зростає на 12 фон.

Таким чином адаптація проявляється у вигляді втрати чутливості слуху при достатньо довгій дії гучного звуку і відновлення її при зменшенні гучності стомливого звуку.

Захисна здатність вуха володіє інерцією, цей механізм починає працювати через 30…40 мс після початку звуку. Повний захист слуху від дії високих рівнів не досягається навіть за 150 мс. Тому для слуху найбільш небезпечні дуже короткі гучні звуки.

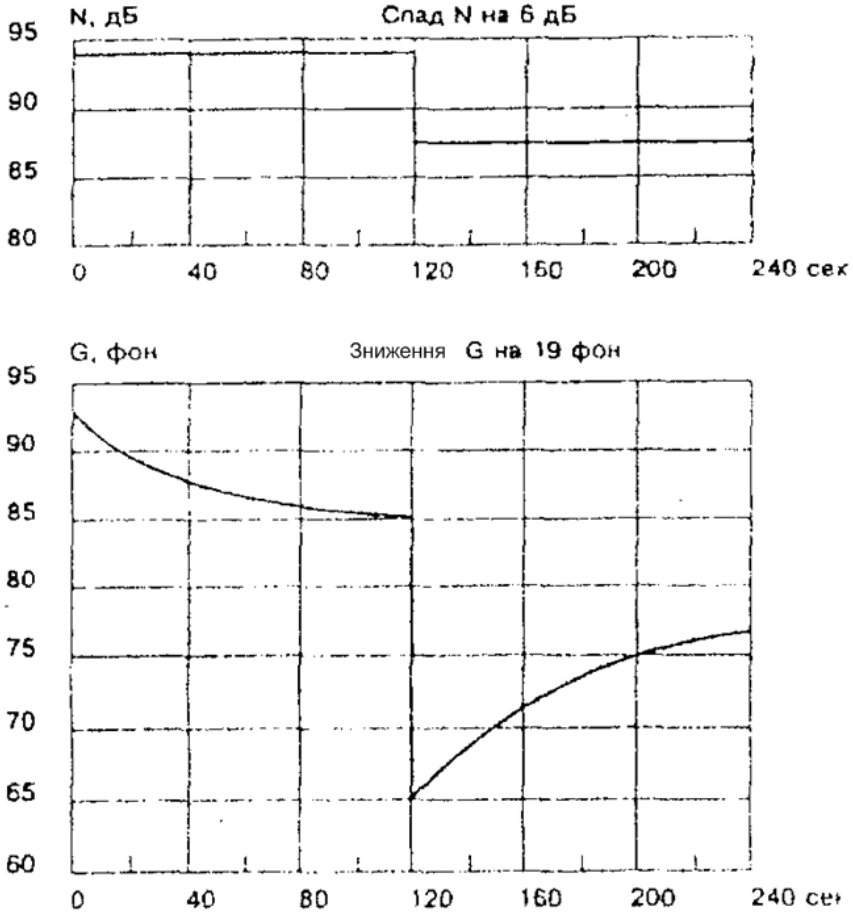


Рис. 2.28. Адаптація слуху при стрибкоподібному зменшенні звукового тиску

Часове маскування. Вище розкрита суть маскування, коли маскований і маскувальний звуки присутні одночасно. Через явище адаптації слуху виникають ситуації, коли достатньо гучні звуки маскують, роблять практично нечутними звуки, які слідують за ними. В деяких випадках маскуються попередні звуки.

Такий вид маскування, коли звуки не перекриваються в часі, називається ***часовим маскуванням***. Воно розділяється на **передмаскування** і **післямаскування.**

Післямаскування проявляється на інтервалі часу через 100…200 мс після закінчення маскувального звуку. Передмаскування проявляється на значно коротші часові інтервали (близько 10…50 мс).

Тривалість передмаскування в значному ступені залежить від особливостей конкретних людей. По цій причині механізми часового маскування при цифровому кодуванні звуку поки не використовуються. Але звукорежисерам ці механізми корисно знати.

Основні особливості часового маскування такі:

- післямаскування більш ефективне, ніж передмаскування;
- більш високий рівень маскування спостерігається при надходженні маскувального звуку через короткий часовий інтервал вслід за звуком, що маскується;

- маскування виражено сильніше, коли маскувальний і маскований звуки подаються в одне вухо;

- рівень маскування зазвичай падає при збільшенні часового інтервалу більше 15 мс;

- збільшення рівня інтенсивності маскувального звуку на 10 дБ викликає зсув порогу маскування на 3 дБ;

- тривалість маскувального звуку впливає на ступінь передмаскування, але не післямаскування;

- часове маскування залежить від частотного співвідношення маскувального і маскованого звуків; маскування проявляється сильніше, коли частоти цих звуків близькі.

5.4. Нелінійність слуху

Слуховий апарат людини є нелінійною системою. ***Нелінійність слуху*** виявляється в тому, що при гучних звуках в слуховому апараті виникають гармоніки аж до 9-ої, рис. 2.29.

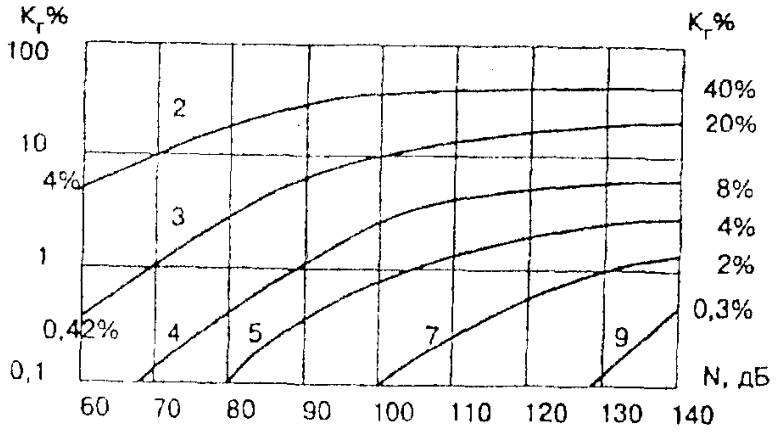


Рис. 2.29. Залежність коефіцієнта суб'єктивних гармонік від рівня звукового тиску (цифрами 2…9 позначені номери гармонік)

Вони – суб'єктивні. Їх немає у вихідному звуці. Поки рівень звукового тиску не перевищує 40 дБ, суб'єктивні нелінійні спотворення не виникають.

При збільшенні рівня більше 60 дБ величина суб'єктивних гармонік різко зростає до 10…50% і може перевищувати інтенсивність основного тону.

Якщо, наприклад, рівень основного коливання складає 100 дБ, то суб'єктивно відчуваються складові другої і третьої гармонік основного коливання з рівнями відповідно 88 і 74 дБ.

Коливання складної форми з достатньо великим рівнем може привести до появи суб'єктивних (*на вході вуха відсутніх!*) комбінаційних складових, причому різницеві складові сприймаються на слух як більш потужні в порівнянні з сумарними.

Викладене і дає підстави для висновку про нелінійні властивості вуха. Суб'єктивні гармоніки 2, 3, 4, і 5-го порядків не приводять до помітного погіршення якості звучання. Вони змінюють лише тембр. Завдяки цьому

звучання часто стає кращим. Існує навіть думка, що звуки з частотою 16…100 Гц сприймаються не самі по собі, а через створювані ними гармоніки, тобто із-за нелінійності слуху. Ще до 1940 р. фірма Philipsрозробила малогабаритний ламповий радіоприймач, в якому добре відтворювались низькі частоти. Це досягалась шляхом введення «синусоїдальних» нелінійних спотворень (другої і третьої гармонік).

Гармоніки 5-го порядку і вище (особливо непарні) помітно погіршують якість звучання.

5.5. Роздільна здатність слуху

Під ***роздільною здатністю слуху***розуміють мінімальні зміни звукового тиску і частоти, які можуть бути помічені слухом.

В слуховій корі великих півкуль мозку є особливі групи клітин, які ніяким чином не реагують на чисті тони, проте реагують на зміни параметрів стимулів.

Є ***нейрони***, які відповідають за зміну інтенсивності. Вони подібні амплітудному детектору.

Амплітудні слухові пороги визначаються як мінімально помітна на слух амплітудна модуляція. «Детектори» працюють в порівняно вузькій смузі частот модуляції – приблизно до 7…12 Гц.

Найбільша їх чутливість досягається коли в часовому вікні слухового аналізатора вкладається половина періоду модуляції, що відповідає частоті модуляції 3,5…6 Гц.

Графіки на рис.2.30 ілюструють зміну порогових значень рівня звукового тиску $\mathbf{N_{пор}}$, при якому помітна на слух амплітудна модуляція заданої величини від 1,5 до 20%.

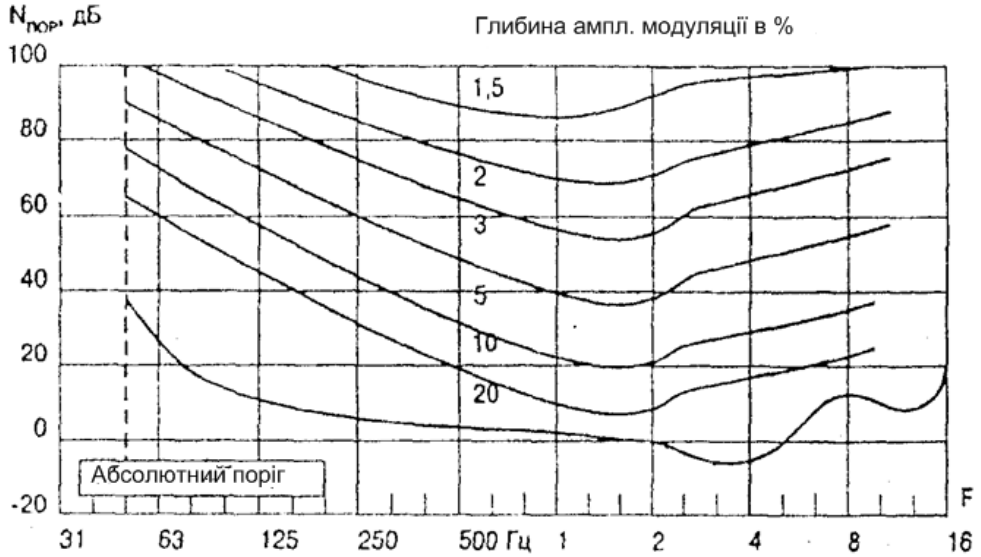


Рис. 2.30 Криві рівної помітності амплітудної модуляції звуку з частотою 4 Гц

Із графіків слідує, що:

- чим менша глибина амплітудної модуляції, тим вище порогові значення рівня звукового тиску, при якому ця модуляція помітна;

- рівень порогу помітності амплітудної модуляції по звуковому тиску мінімальний в області частот 1…2 кГц, до нижніх і верхніх частот суттєво зростає;

- криві однакової помітності амплітудної модуляції по формі близькі до форми кривих рівного рівня гучності.

Роздільна здатність слуху до амплітудної модуляції визначається відношенням приросту звукового тиску до середнього значення тиску $\Delta P_{зв}/P_{зв}$.

Частотні слухові пороги визначаються як мінімально помітна на слух частотна модуляція. *Найбільша чутливість слуху до частотної модуляції спостерігається при частоті близько* **4 Гц.**

На рис.2.31 представлені криві зміни порогового значення рівня звукового тиску $\mathbf{N_{пор}}$, при якому помітна на слух частотна модуляція з індексом модуляції від 0,2 до 10%.

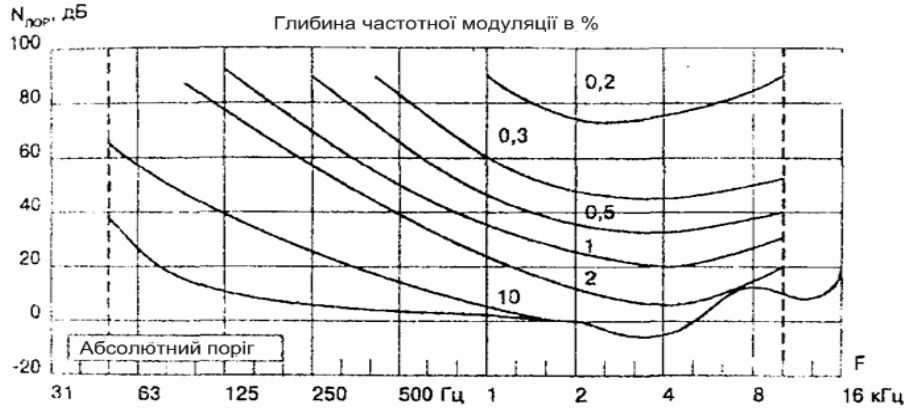


Рис. 2.31. Криві рівної помітності частотної модуляції звуку з частотою 4 Гц

Із графіків слідує, що:

- значення глибини (індекса $F_{мод}/F$) частотної модуляції, яка помітна, значно менше, ніж при амплітудній модуляції;

- чим менша глибина частотної модуляції, тим вище значення рівня звукового тиску, при якому ця модуляція помітна;

- рівень порогу помітності частотної модуляції по звуковому тиску мінімальний в області частот 2…4 кГц; до верхніх і особливо нижніх частот він суттєво зростає;

- абсолютне значення помітних змін частоти складає від 2 до 10 Гц.

Із кривих частотної роздільної здатності слуху (рис. 2.32) слідує, що:

- частотна роздільна здатність сильно залежить від гучності звуку: зі зменшенням гучності зменшується роздільна здатність звуку;

- частотна залежність частотної роздільної здатності слуху зі зменшенням гучності звуку змінюється різкіше.

Порівняння двох видів модуляції (амплітудної і частотної) чистого тону показує, *що при низьких частотах модуляції вухо виразно сприймає коливання гучності при амплітудній модуляції і висоти тону при частотній модуляції.*

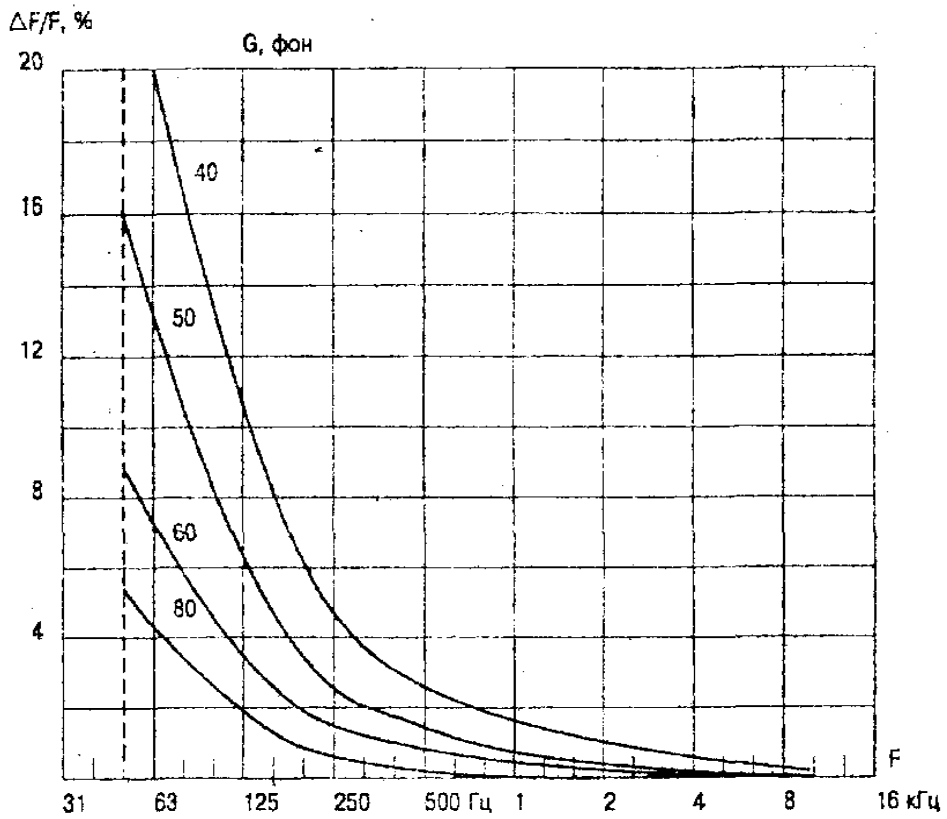


Рис. 2.32. Криві частотної роздільної здатності слуху

Починаючи з частоти модуляції близько 10 Гц (індивідуальний розкид різних людей складає 7…12 Гц) *сигнали, модульовані по амплітуді і частоті, звучать однаково, нагадуючи трель міліцейського свистка*.

Амплітудна і частотна модуляції звуку можуть мати як сприятливу, так і несприятливу дію на слух. Тому відповідь на питання, яка роздільна здатність (висока чи низька) краще, не має однозначної відповіді. Наприклад, *в музиці для збагачення звучання часто використовується навмисна амплітудна і частотна модуляція* (**тремоло**, амплітудне або частотне **вібрато**). Частоту модуляції бажано вибирати близькою до найбільш чутливого значення – **4 Гц.**

З іншого боку, згадані «детектори» можуть чітко вловлювати спотворення, що викликані звуковою технікою. Завдяки своїм частотним детекторам, слух виявляється чутливим до паразитної частотної і амплітудної модуляції звукових сигналів, обумовленних коливанням носія (наприклад, магнітної стрічки через змінний контакт між стрічкою і головками) апаратури звукозапису. При цьому виникає спотворення, яке називається ***детонацією звуку*** (слово «детонація» запозичене із вокальної термінології, де воно означає фальшиву ноту в співі). Бажано, щоб така паразитна модуляція була непомітна на слух. Якщо є можливість, то бажано частоту модуляції зробити менше або більше 4 Гц.

Паразитна амплітудна модуляція звукових сигналів завжди супроводжується ***паразитною частотною модуляцією*** при прослу-ховуванні задетонованих звукових програм в приміщенні. Так, при інтерференції прямих і

відбитих хвиль слабка частотна модуляція претворюється в сильну амплітудну, оскільки поблизу органів слуху додаються коливання з різною частотою.

5.6 Бінауральні властивості слуху

Властивість сприйняття, при якому звуковий образ в формі одного або декількох ***уявних джерел звуку*** (***УДЗ***) розміщуються в просторі, називається *просторовою локалізацією звукового образу*.

Слуховий простір з уявними і фізичний з реальними джерелами звуку звуку не тотожні. Між ними немає взаємнооднозначної відповідності. *Декільком реальним джерелам звуку може відповідати одне уявне джерело, і, навпаки, звук одного реального джерела може здаватись тим, що виходить з різних місць в залежності від характеру звуків, які ним створюються.*

При локалізації УДЗ використовуються ***моноуральні*** (які визначаються лише одним вухом) і ***бінауральні*** (що визначаються двома вухами) властивості слуху.

Бінауральним слухом називається його здатність визначати напрям приходу звукової хвилі, *тобто локалізувати положення джерела звуку в просторі.* Ця здатність досягається завдяки просторовій несумісності двох вух в поєднанні з екрануючим впливом голови. Збудження правого і лівого вух завжди неідентичне. Цей факт забезпечує людині можливість сприймати просторовий звуковий світ і оцінювати переміщення джерел звуку в цьому просторі.

Бінауральна властивість слуху випливає із відмінностей акустичних сигналів, прийнятих лівим і правим вухами (рис. 2.33).

На малюнку ліве (Л) і праве (П) вухо зображені умовними графічними зображеннями мікрофонів. Інформація від них поступає по слухових нервах (3) до равликових ядер (1) і далі в так звані верхні оливи (2). Причому велика частина енергії нервових імпульсів від лівого вуха поступає в праву оливу і звідти – в праву півкулю слухової кори головного мозку; аналогічний шлях інформації від правого вуха в ліву півкулю.

Алгоритми обробки сигналів в слуховій корі вивчені недостатньо. Проте, *встановлено, що у більшості людей (95% лівшів) в лівій півкулі виділяються і обробляються змістові ознаки акустичної інформації, а в правому – естетичні*. Цей факт підтверджується дослідами по діагностичному (роздвоєнному) сприйняттю мови і музики.

Так, при *підведенні різних мовних сигналів до лівого і правого вуха* (наприклад, при слуханні лівим вухом одного, а правим вухом іншого набору цифр) *слухач віддає перевагу тому з них, який чує правим вухом*. І, навпаки, **при слуханні лівим і правим вухами двох різних мелодій перевага віддається тій, що слухається лівим вухом.**

Фізичною основою цих відмінностей є різночасність приходу звукової хвилі до різних вух (вуха «рознесені» в просторі) і дифракція звукових хвиль біля голови слухача.

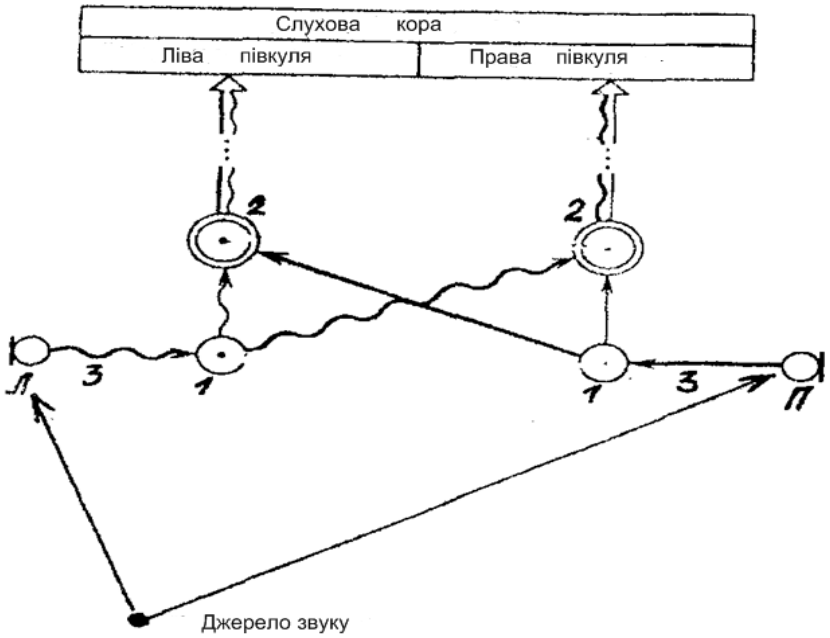


Рис. 2.33. Передача звукових сигналів в слуховій системі

*До основних властивостей **бінаурального слуху** відносять:*

- **просторову локалізацію**;
- **ефект передування;**
- **бінауральне маскування(і демаскування) звуків.**

Подібні можливості слуху реалізуються, завдяки:

- неспівпадіння моментів дії однакових фаз звуку на ліве і праве вухо ($\Delta\tau_б=\Delta x/C_{зв}$, де Δx – різниця шляхів приходу звукової хвилі до вух, а $C_{зв}$ – швидкість звуку),
- неоднаковості величин звукових тисків ($\Delta N_б$) на ліве і праве вухо внаслідок дифракції звукової хвилі навколо голови, наприклад, утворення акустичної тіні зі сторони, зворотньої джерелу звуку,
- різниці, що виникає в спектральному складі звуків, які сприймаються лівим і правим вухом, внаслідок неоднакового екрануючого впливу голови і вушних раковин на низьких і високих звукових частотах.

При обробці звукового сигналу достатньо обійтись двома ***бінауральними різницями***, а саме – ***інтенсивністною*** $\Delta N_б$ і ***часовою*** $\Delta\tau_б$. Бінауральна обробка можлива лише в тих відділах мозку, куди сходяться сигнали від обох вух, причому обробляються саме ці бінауральні різниці.

Рис. 2.34 відображає виникнення різниці приходу звукової хвилі в лівому і правому вусі слухача.

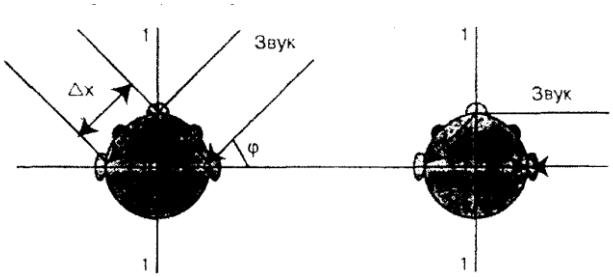


Рис. 2.34. Виникнення різниці приходу звукової хвилі в ліве і праве вухо слухача

Максимальна різниця ходу звукової хвилі від лівого до правого вуха Δx=21 см при середній базі (відстані) між вухами порядку 18 см і розміщені джерела звуку під кутом 90^0 (збоку). Максимальний час затримки для синусоїдальних звуків з частотою не вище 800 Гц

$$\Delta\tau_б=\Delta x/C_{зв}=0{,}63 \text{ мс.} \qquad (2.11)$$

Тут $C_{зв}$ – швидкість розповсюдження звуку.

На більш високих частотах час запізнення стає більше половини періоду коливання, тому поняття фази втрачає зміст. Із дослідів знайдено, що *чисті тони частот вище 8 кГц майже не піддаються локалізації. Слабо виражена здатність локалізації і на частотах нижче 300 Гц, а на частотах нижче 150 Гц локалізація взагалі не проявляється.* Із цього, до речі, слідує висновок про те, що ***низькочастотні акустичні системи при стереовідтворенні не критичні до розміщення:*** їх можна розміщувати, де зручно.

Найбільша точність локалізації джерела звуків досягається при сприйнятті складних звуків і звукових імпульсів. При цьому важливий спектральний склад звуків. Наприклад, якщо звук містить і низькочастотні і високочастотні складові і діє під кутом 90^0 на праве вухо, то в лівому вусі високочастотних складових не виявиться із-зі тіні голови, рис. 2.34. Низькочастотні складові мають довжину хвилі більшу від діаметра голови і огинають голову, і тому не дають звукової «тіні».

Найменший кут сприйняття відхилення джерела (***бінауральна роздільна здатність слуху для фронтального напрямку***), яке відчувається, може досягати $\mathbf{3^0}$. ***Точність локалізації джерел звуку***, розміщених зліва і справа, значно менша і складає приблизно $\mathbf{12^0}$. Для тильного напрямку ця величина складає близько $\mathbf{6^0}$.

Таким чином, слухова система уподібнюється **акустичному пеленгатору**. Досліди показують, що слухова система людини і багатьох деннихтварин – не дуже гарний пеленгатор. Іноді, особливо при вузькосмугових сигналах, виникає ***помилка «фронт – тил»***: *УДЗ знаходиться в протилежній стороні від реального джерела звуку.При широкосмугових сигналах від джерела ймовірність такої помилки знижується*, тобто різниця пеленгів на УДЗ і реальні джерела звуку в горизонтальній площині (по азимуту) доходять до $\mathbf{10…15^0}$, а в вертикальній площині (по куту місця) – ще більше.

Природою «передбачено» так, *що у людей і тварин провідна роль в орієнтуванні належить зору, а не слуху*. Коли звук почутий, і напрям його приходу грубо визначений, виробляється безумовний зорово-слуховий рефлекс,

який заставляє повертати голову і відслідковувати джерело звуку очима. По цій же причині вибирається установка, завдяки якій УДЗ поєднуються з зображеннями акторів, що розмовляють, на екрані кіно і телевізорів.

Поряд з азимутом *слухач оцінює відстань до джерела звуку*.

При середніх відстанях до джерела звуку 3…15 м наближення і віддалення джерела звуку супроводжується зміною його інтенсивності. У вільному звуковому полі на низьких частотах збільшення відстані вдвоє супроводжується зменшенням рівня звукового тиску на 6 дБ.*На слух відстань визначається меншою, ніж в реальності.Помилка зростає зі зростанням відстані.*

На близьких відстанях менше 3 м на ***глибинну локалізацію*** чинить вплив *дифракція на вушній раковині і голові*, тобто виявляється різниця рівнів інтенсивності і часові затримки. Точність глибинної локалізації при зміщенні широкосмугового джерела від 0,5 до 1,5 м не перевищує **15…30%**.

При великих відстанях (більше 15 м) починає виявлятись загасання, яке залежить від відстані, яку проходить звукова хвиля. При цьому високочастотні складові загасають швидше (змінюється тембр). *На розповсюдження звуку виявляють вплив вологість повітря і напрямок вітру*. *Збільшення амплітуди низькочастотних складових спектру звука викликає відчуття наближення джерела звуку, а штучне зменшення високочастотних складових сприймається як віддалення джерела звуку.*

Здатність слухової системи до визначення відстані до УДЗ виражені слабше від здатностей до оцінки направленя і спираються в основному на ***моноуральні властивості слуху***. Але біноуральна складова сприйняття допомагає підвищити точність оцінки відстані. При цьому орган слуху підсвідомо оцінює величини $\Delta N_б$ і $\Delta\tau_б$, які діють на ліве і на праве вуха. При відстанях більше 10 м ці фактори перестають працювати.

Відома гіпотеза, що в основі дистанційного слуху лежить порівняння вже відомого відчуття гучності із заново випробуваним, тобто використовується слухова пам'ять. Якщо слухач добре знайомий зі звуковим сигналом, то відстані до УДЗ і реального джерела звуку співпадають. Для незнайомих звуків оцінки відстані стають розпливчатими, і на дистанції більше 3 м віддаленість УДЗ не залежить від відстані до реального джерела, а залежить тільки від гучності.

В користь даної гіпотези виступає наступне. Величини $\Delta N_б$ і $\Delta\tau_б$*є не лише лінійними функціями азимутального кута, але і залежать від частоти.Вони змінюються при переході від однієї частотної групи (критичної смуги).* Дійсно, при локалізації джерел звуку параметри $\Delta N_б$ і $\Delta\tau_б$ повністю взаємозамінні.

При оцінці азимуту орган слуху «обмінює» еквівалентне значення інтенсивностей різниці $\Delta N_б$ на часову різницю $\Delta\tau_б$:

$$\Delta N_б = K_E \cdot \Delta\tau_б, \qquad (2.12)$$

де K_E – коефіцієнт еквівалентності.

Сумарне значення еквівалентної інтенсивності $\Delta N_{сум} = \Delta N_б + K_E \cdot \Delta\tau_б$ є додатковим фактором для визначення азимута на джерело звуку. На низьких

частотах (<500Гц) $\Delta N_б << K_E \cdot \Delta\tau_б$. В діапазоні середніх частот (від 500 до 5000 Гц) обидва фактори $\Delta N_б$ і $\Delta\tau_б$ приблизно в рівній степені сприяють створенню відчуття направлення.

Таким чином, при оцінці азимуту джерела звуку голова і вушні раковини виконують функцію просторового фільтру. Судження про азимут звязане з оцінкою слуховим апаратом відмінностей пар $\Delta N_б$ і $\Delta\tau_б$ для кожного вуха. Така оцінка здійснюється в кожній частотній групі слуху і порівнюється з завченими (набутими врезультаті досвіду) прикладами, які зберігаються в слуховій пам'яті.

Властивості слухової системи вивчаються і використовуються стосовно до штучних акустичних умов стереофонії. Положення УДЗ в стереофонічних системах визначається пристроєм цих систем (включаючи приміщення) і звукорежисурою програми.

Управління бінауральними різницями $\Delta N_б$ і $\Delta\tau_б$ є одним із засобів стереофонічної режисури. Висока якість звучання стереофонічних програм в порівнянні з монофонічними пояснюється не лише спеціально організованою просторовою локалізацією звукового образу, але і розширенням поля сприйняття тембральних ознак звуку. В стереофонічній системі створю-ються додаткові стимули для спектральних відмінностей лівого і правого бінауральних сигналів.

Ефект передування. В приміщеннях поряд з прямим звуком на слухача діє значне число відбитих звукових хвиль, важливим фактором, що стимулює глибинну локалізацію, є ефект передування.

Суть цього ефекту полягає у відділенні слуховою системою прямого звуку від його реверберaційних продовжень. *Судження про напрямок на джерело звуку формують прямі звуки, а слідуючі за ними повторення на інтервалі від 1,5 до 30…50 мс придушуються слуховою системою за рахунок післямаскування*. При великих затримках придушення не відбувається.

Завдяки ефекту передування *виявляється можливою слухова пеленгація джерела звуку в приміщеннях, де в точку розміщення слухача поряд з прямим звуком поступає значне число відбиттів звуку від поверхонь.*

Бінауральне маскуваннязвуків. Коли маскувальний і маскований звуки надходять в різні вуха, то говорять про бінауральне маскування. Величина зсуву звукового порогу при бінауральному маскуванні завжди менша, ніж при моноуральному маскуванні, і вона проявляється переважно на високих частотах. Згадане маскування виникає при умові, якщо час діючого звуку не менше 250 мс.

Найбільш яскраво виражене маскування, коли маскувальний звук близький до маскованого по частоті. При цьому (на відміну від моноуурального маскування) відсутні биття, і маскування проявляється в дуже вузькій смузі частот, яка приблизно співпадає з шириною критичних смуг слуху, рис. 2.35.

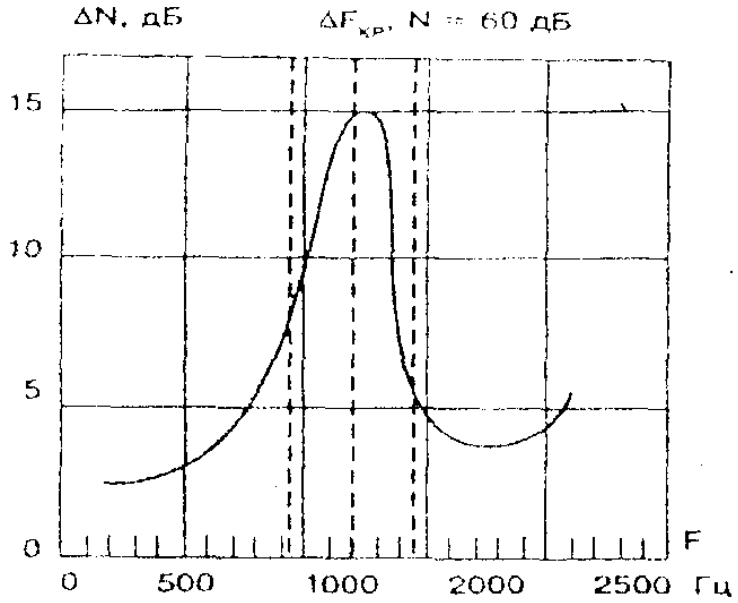


Рис. 2.35. Крива бінаурального маскування

Якщо в стереотелефони одночасно подати один і той же шум і один і той же маскований звук, то крім шуму слухач нічого не почує. *Якщо ж маскований звук подати лише в одне вухо, то він буде чутним:* його рівень суб'єктивно збільшиться. Цей ефект і називається бінауральним маскуванням. *При цьому шум і звук локалізуються в різних місцяхмозку – шум в середині голови, а звук ближче до вуха, на яке воно подається*. Як наслідок, демаскування здійснюється із-за різної суб'єктивної локалізації шуму і звуку.

Аналогічне явище спостерігається при тихій розмові в шумній аудиторії (наприклад, на дискотеці). Людина мимовільно повертає голову і знаходить положення, при якому в обидва вуха надходить однаковий шум, який сприймається в середині голови. Звук розмови локалізується в іншому місці – ближче до вуха, і він гарно чутний. Знайдено, що даний механізм «працює» тільки при наявності в спектрі низькочастотних складових.

Бінауральне демаскування звуків.Здатність налаштовуватись на одне із багатьох одночасно діючих джерел звуків є однією із чудових особливостей людського слуху, що пов'язана з бінауральним демаскуванням звуків.

Бінауральним демаскуванням називається *зниження порогу маскування при виділенні окремих звуків із одночасно діючих на слухача із сукупності.* Це досягається шляхом додаткової обробки звуків як в периферійному, так і в центральному відділах слухової системи і мозку. Зазвичай звуки мають спектри, які перекриваються, тому класична теорія фільтрів з її частотними областями пропускання і затримки для даного явища не може вважатись прийнятним. Вухо є більш тонким інструментом.

Бінауральні властивості слуху розширюють можливості сприйняття. Так, в групі людей, що одночасно розмовляють, слухачеві легко за допомогою бінаурального демаскування виділити один із голосів, зосередивши на ньому увагу. Якщо слухач закриє собі одне вухо, то виділити потрібний голос стане дещо складніше, виділити його при відтворенні магнітофонного запису

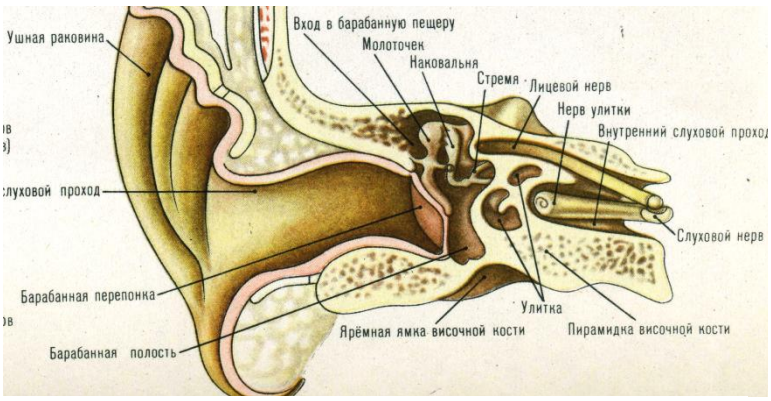
групової розмови майже неможливо. *Це свідчить про те, що із поля сприйняття слухача випадають стимули, які були в розпорядженні бінаурального слуху для виділення голосу в натовпі.*

Або, інший приклад. Прослуховуючи звучання симфонічного оркестру в концертному залі, слухач виразно сприймає і розділяє розміщення інструментів в горизонтальній площині на сцені, їх розміщення по глибині, а також відчуває просторовість звукового образу. Бінауральне демаскування передбачає використання слухової системи часових ($\Delta\tau_б$) і інтенсивнісних ($\Delta N_б$) відмінностей пар бінауральних звуків, що відповідають окремим джерелам для їх розділення один від одного.

Питання для самоконтролю

1. Що називається звуковим полем? Як оцінюється його рівень?
2. Що розуміють під абсолютним динамічним рівнем мовленнєвого сигналу? Чому вимірювачі рівня мовленнєвого сигналу можуть мати різну сталу часу?
3. Що розуміють під динамічним діапазоном мовленнєвого сигналу? Для яких цілей введено цей параметр?
4. Що розуміють під спектральною густиною потужності мовленнєвого сигналу, як вона вимірюється і для яких цілей необхідне знання цієї характеристики?
5. Якими психоакустичними параметрами оцінюється висота тону звука, що сприймається слухачем? Аргументуйте їх зв’язок з фізичними параметрами.
6. Якими психоакустичними параметрами оцінюють рівень гучності і гучність звуку, що сприймається слухачем? Аргументуйте їх зв’язок з фізичними параметрами.
7. Дайте характеристику часовим і нелініймим властивостям слуху.
8. Що розуміють під роздільною здатністю слуху?
10. Дайте характеристику бінауральним властивостям слуху.

ДОДАТОК Б. РОЗДАТНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ЛЕКЦІЇ №2



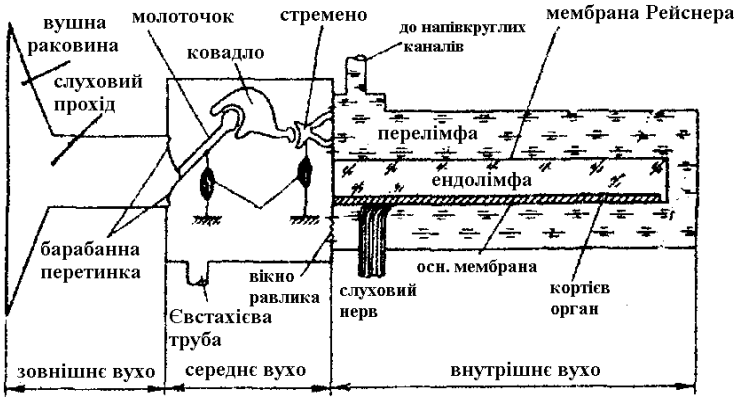


Рис.2.1. Будова органу слуху

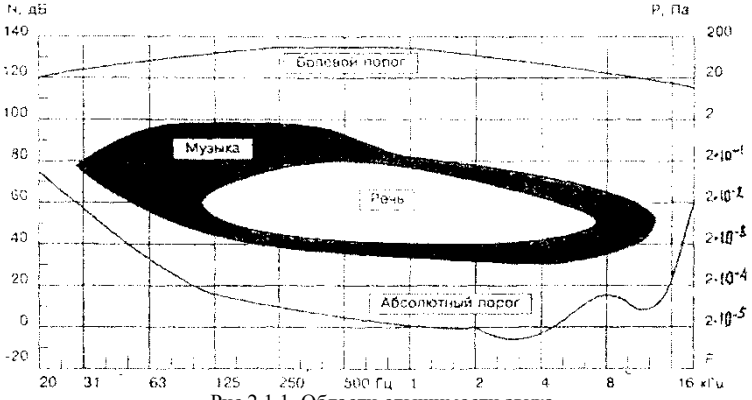


Рис.2.1.1. Области слышимости звука

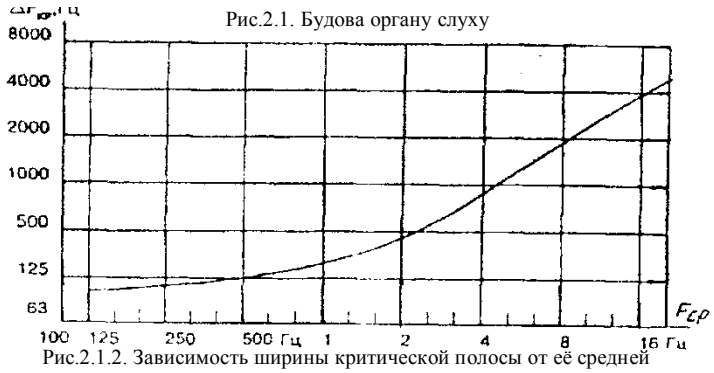


Рис.2.1.2. Зависимость ширины критической полосы от её средней частоты

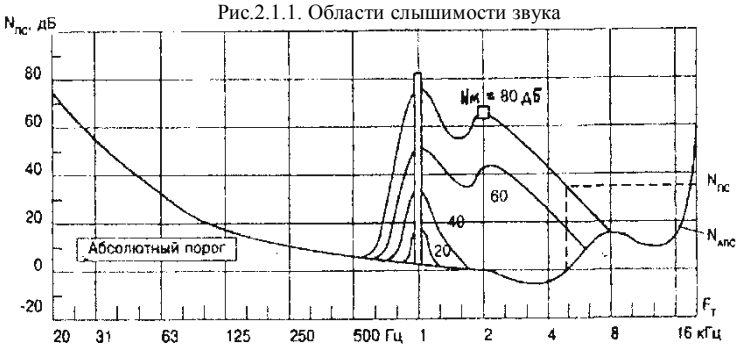


Рис. 2.1.3. Кривые порога слышимости тона с частотой $F_т$ при маскировке тоном с частотой $F_м$ = 1 кГц и уровнем $N_м$ дБ

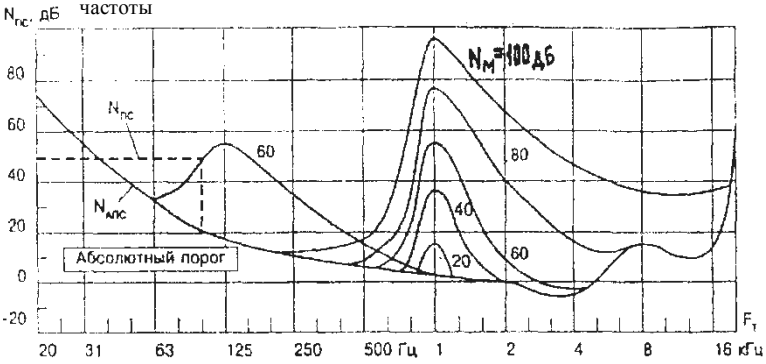


Рис.2.1.4. Кривые порога слышимости тона с частотой $F_т$ при маскировке узкополосным шумом с центральной частотой $F_м$ = 1 кГц и уровнем $N_м$ дБ

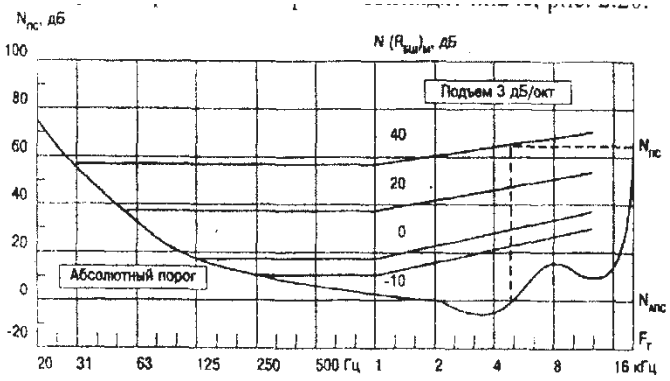


Рис. 2.1.5. Кривые порога слышимости тона с частотой $F_т$ при маскировке белым шумом с уровнем спектр.плотн. $N(R_{БШ})_М$, дБ

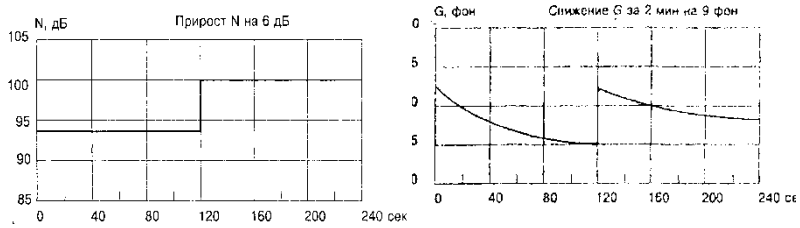


Рис.2.1.7. График адаптации слуха при увеличении звукового давления

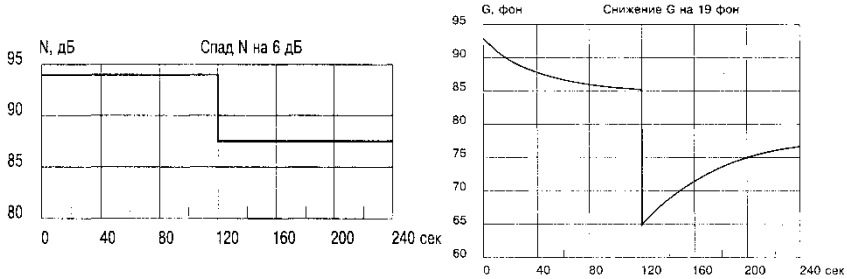


Рис.2.1.8. График адаптации слуха при уменьшении звукового давления

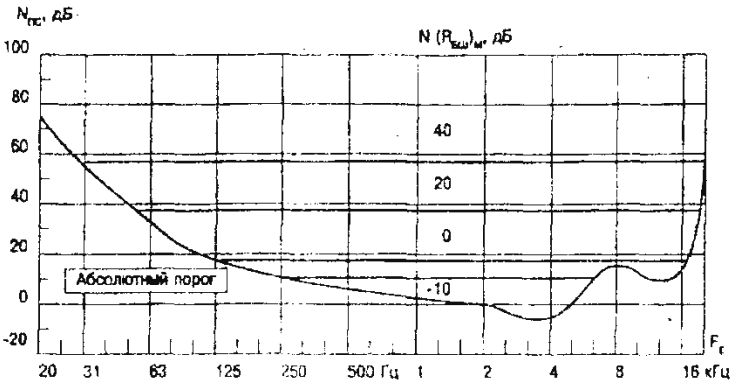


Рис.2.1.6. Кривые порога слышимости тона с частотой $F_т$ при равномерно маскирующем шуме с уровнем спектр.плотн. $N(R_{Ш})_М$

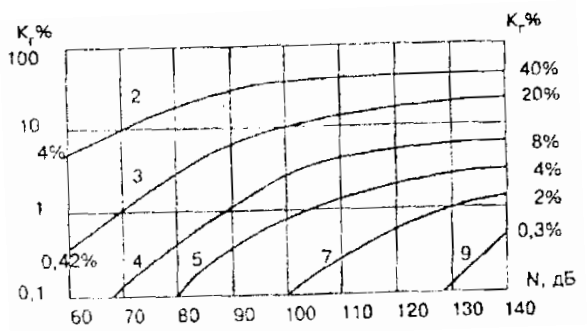


Рис. 2.1.9. Зависимость коэффициента субъективных гармоник от уровня звукового давления (цифры 2 … 9 –номера гармоник)

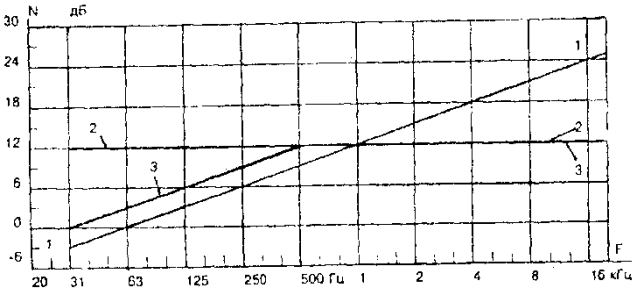
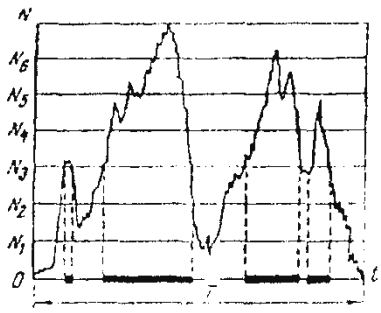
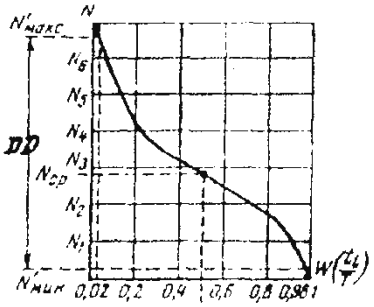


Рис. 2.2. Частотная зависимость спектральной плотности мощности шумов





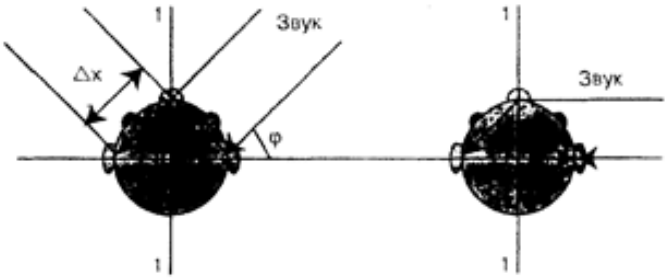


Рис. 2.31. Виникнення різниці приходу звукової хвилі в ліве і праве вухо слухача

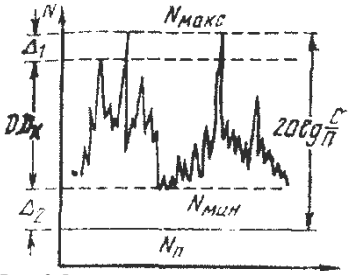


Рис. 2.5. к определению динамического диапазона вещательного сигнала

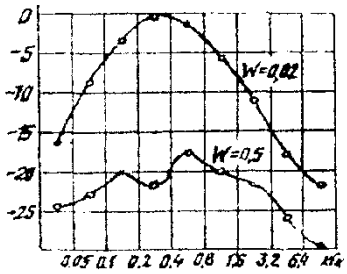


Рис.2.6.Спектральная плотность квазимаксимальной N(0,02) и средней N(0,5) мощности отрывка оркестровой музыки

Рис.2.4. Определение динамического диапазона и пикфактора сигналов по квантилям распределения уровней

Таблица 2.1. Динамический диапазон некоторых звуковых программ

Вид программы	Натуральное звучание	Фонограмма
Речь диктора	25 … 35	15 … 20
Актерская речь	35 … 45	25 … 30
Малые ансамбли	45 … 55	35 … 40
Симфонический оркестр	65 … 75	40 … 45

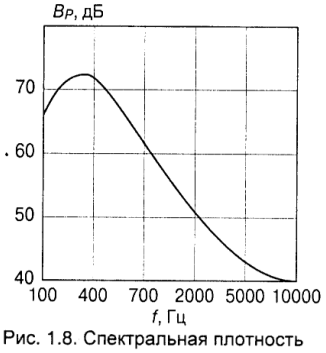


Рис. 1.8. Спектральная плотность мощности русской речи

Таблица 1.1. **Частотные диапазоны некоторых источников звука**

Источник звука	Граничные частоты	
	нижняя, Гц	верхняя, кГц
Мужской голос	100	7
Женский голос	200	9
Рояль	100	5
Скрипка	200	14
Шум шагов	100	10
Аплодисменты	150	15

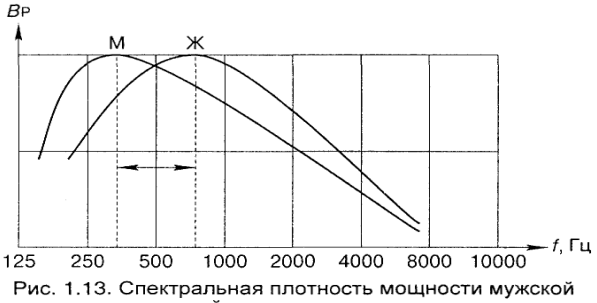


Рис. 1.13. Спектральная плотность мощности мужской и женской речи

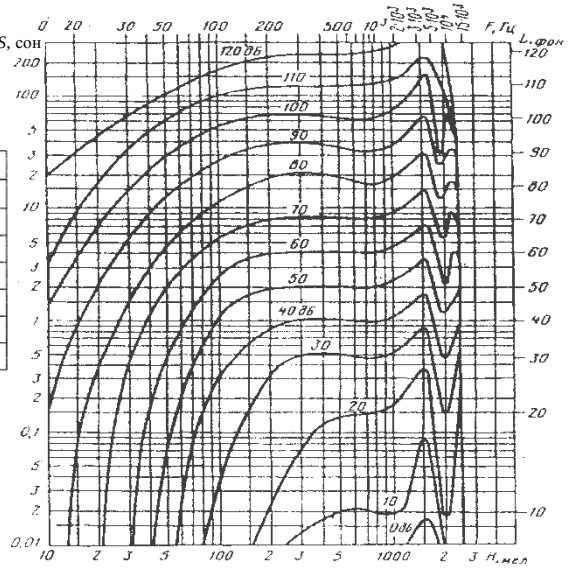


Рис. 2.17. Частотная характеристика слухового анализатора

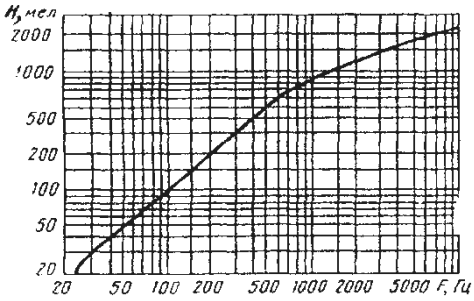


Рис. 2.8. Сенсорная характеристика высоты тона

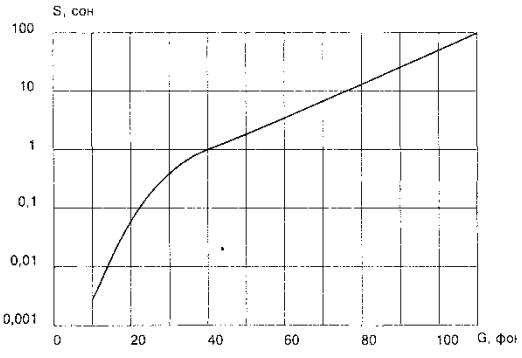


Рис. 2.9. Зависимость громкости тонального звука его уровня громкости

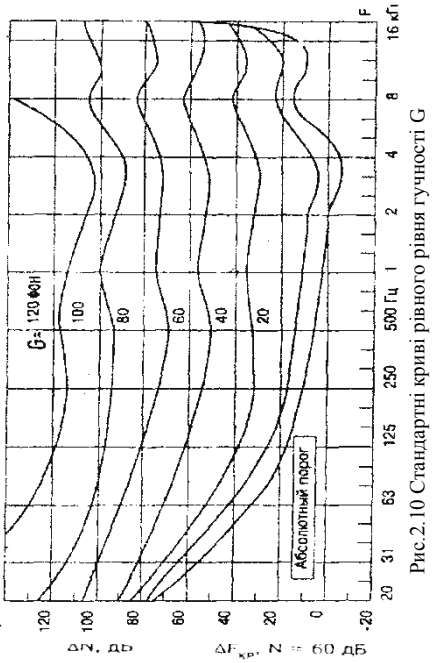
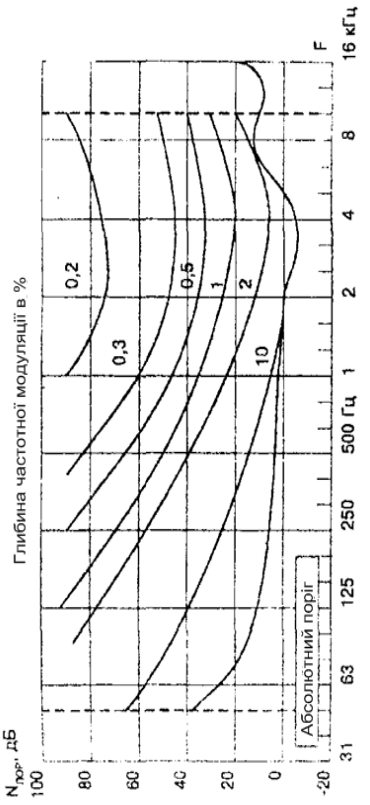


Рис.2.10 Стандартні криві рівного рівня гучності G



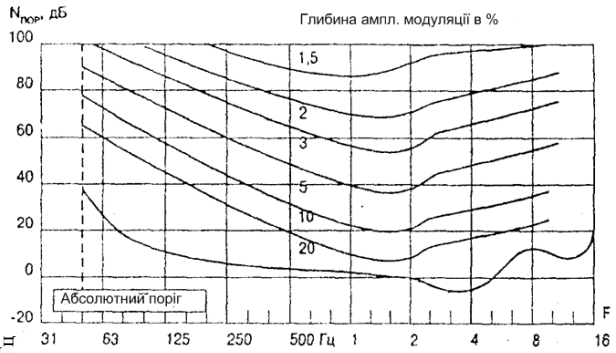


Рис. 2.27. Криві рівної помітності амплітудної модуляції звуку з частотою 4 Гц

Рис. 2.30. Криві рівної помітності частотної модуляції звуку з частотою 4 Гц

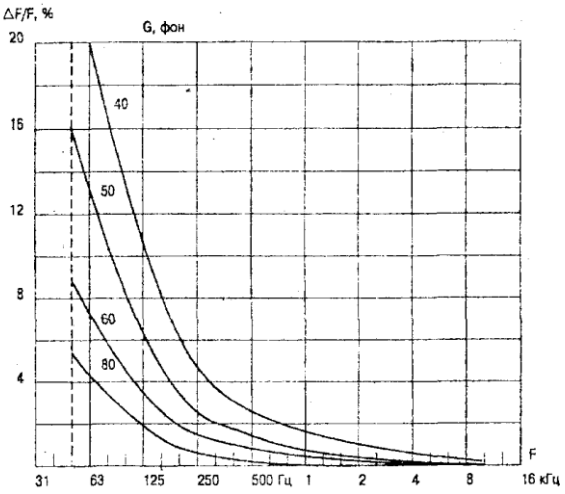


Рис. 2.32. Криві частотної роздільної здатності слуху

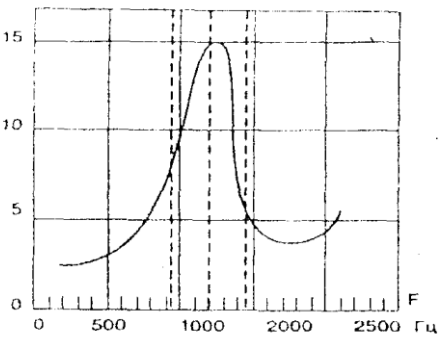


Рис.2.35 Крива бінаурального маскування

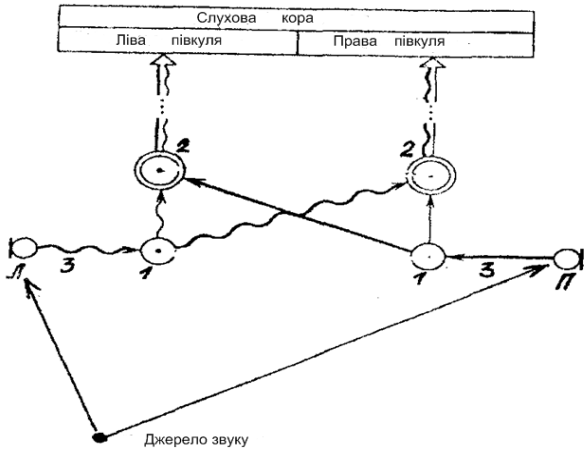


Рис.2.33 Передача звукових сигналів в слуховій системі

ЛЕКЦІЯ №3 РАДІОБУДИНОК

ЛІТЕРАТУРА:

1. Брагин А.С. Технологии вещательных служб. Часть 1. Технологии звукового радиовещания. –К.: НТУУ «КПИ», 2006.
2. Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов./Под ред. Ю. А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком., Радио и связь, 2007. – 872 с.

РОЗДАТНИЙ МАТЕРІАЛ: див. ДОДАТОК В

1. Загальна характеристика

Організаційно тракт формування програм мовлення зосереджується в ***радіобудинках*** (радіотелемовних центрах), телевізійних центрах. У кожному з них передбачається дві структури, тісно пов'язані між собою - *творча (художня) і технічна.*

У *першу структуру* входять редакції і інші творчі об'єднання, спеціалізовані за видами мовлення, дикторська група, група звукорежисерів, відділ випуску, відділ координації і ін. (за принципом розділення професійних обов'язків).

Другу структуру, названу апаратно-студійним комплексом (АСК), утворюють студії, апаратні та деякі допоміжні служби.

Творчі і технічні підрозділи призначені для підготовки і виконання складових частин програм мовлення, формування (творчої і технічної компоновки), запису і подальшої передачі в тракти первинного розподілу програм мовлення.

Для ілюстрації на рис.3.1 приведений приклад планування студійного корпусу радіобудинку.

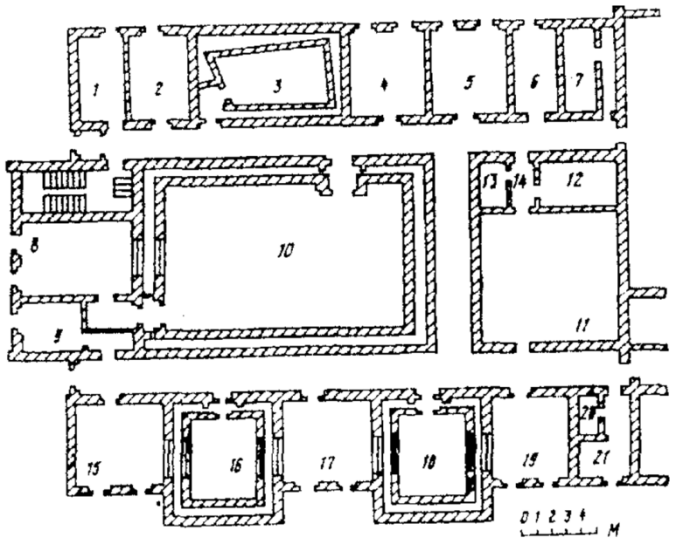


Рис. 3.1. Приклад планування студійного корпусу радіобудинку

На цьому малюнку:

1 - кімната для зберігання і видачі репортерських магнітофонів;

2 - апаратна монтажу позастудійних записів і розшифровки фонограм;

3 - кімната «луна»;
4 - апаратна перезапису;
5 - апаратна запису і монтажу;
6 – картотека;
7 – глушники;
8 - студійна апаратна;
9 - кімната дикторів і того, хто випускає програму;
10 - камерна студія;
11 - фонотека з приміщеннями для зберігання фондових (12) і оперативних (13) записів і кабіною прослуховування (14);
15 і 19 - апаратні мовлення;
16 і 18 - мовні студії;
17 - апаратна запису;
20 - кабельна шахта;
21 - кімната технічного персоналу.

Приклад планування літературно-драматичного блоку для здійснення радіопостановок, показаний на рис.3.2.

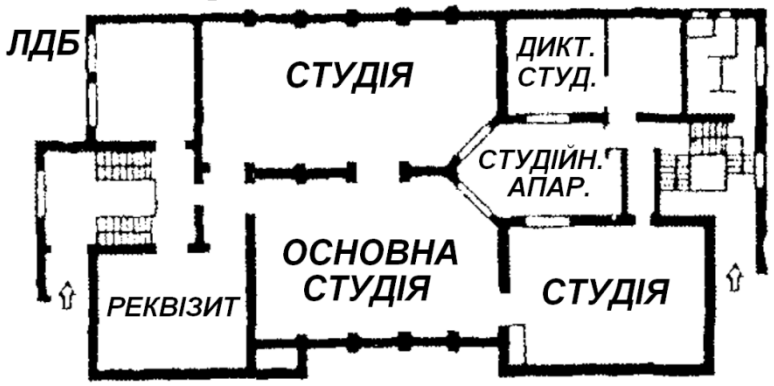


Рис.3.2. Приклад планування літературно-драматичного блоку

Основна студія площею близько 200 м^2 об'ємом 2000 м^3 призначена для проведення сцен з великою кількістю виконавців в нормальній акустичній обстановці. До основної студії примикають ще дві. Одна з них є заглушеним приміщенням для імітації сцен, що відбуваються на відкритому повітрі (тобто за відсутності реверберації).

Друга є «гучним» приміщенням. Ехо-камера зазвичай розміщується поверхом нижче. Студійна апаратна має переглядові вікна в кожну студію і в дикторську студію.

2. Апаратно-студійний комплекс радіобудинку

АСК - це сукупність взаємозв'язаних функціональних блоків і служб, що розміщені в одному або декількох будівлях і містять технічні засоби, за допомогою яких ведеться технологічний процес формування і випуску програм звукового і телевізійного мовлення.

У загальному випадку великий АСК містить (рис.3.3) ***аппаратно-студійні блоки*** (АСБ, в них створюються окремі частини програми) та

апаратно-програмні блоки (АПБ, в них формуються програми).

Сигнали, що відображають ці програми, прямують на вихід радіобудинку, в тракт первинного розподілу сигналів мовлення.

Апаратно-програмні блоки (АПБ) мають устаткування, схоже з устаткуванням АСБ, але володіють багатшими комутаційними можливостями. Всі програми, сформовані в АПБ. поступають в центральну апаратну.

Кожен АСБ *складається* із ***студії*** (де реалізується творча частина програми) і ***студійної апаратної*** (обладнаної відповідною технікою). Іноді при студії обладнується дві апаратні - *запису* і *мовлення*, що обумовлене різною технологією мовлення і запису. У апаратно-студійному комплексі з невеликою кількістю студій апаратні запису і мовлення можуть поєднуватися з центральною апаратною.

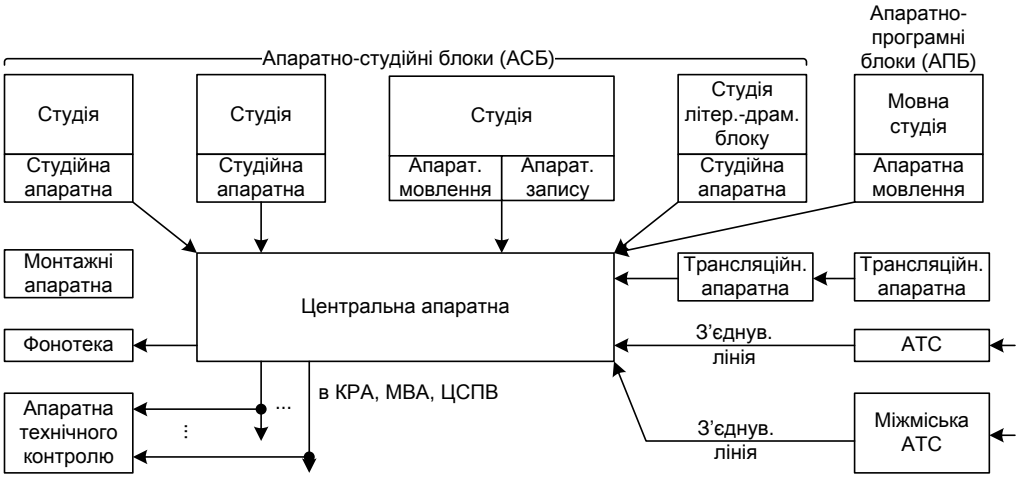


Рис. 3.3. Структура великого апаратно-студійного комплексу

У ***монтажних апаратних*** знаходяться технічні засоби, призначені для підготовки частин майбутніх програм.

Розрізняють апаратні *монтажу фонограм, апаратні зведення і монтажу фонограм* і *апаратні підготовки програм*.

Апаратна запису дозволяє широко користуватися пробними репетиційними записами.

Програми, намічені до передачі після репетицій, записуються на носій (наприклад, магнітну стрічку) і передаються в апаратно-програмний блок (або центральну апаратну).

Апаратна монтажу фонограм призначена для порівняно нескладного монтажу музичних і мовленнєвих фонограм, переважно після первинного запису.

Апаратна зведення і монтажу фонограм містить комплекс технічних засобів, призначених для отримання фонограми з сигналів, записаних на багатодоріжковому магнітофоні у вигляді окремих партій музичних інструментів або груп інструментів.

У ***апаратній підготовки програм*** при відносно нескладній роботі (наприклад, при вирівнюванні рівнів фонограм) або зовсім без роботи по

регулюванню і перетворенню сигналів формуються частини майбутньої передачі з фонограм - оригіналів окремих творів.

Готові фонограми-оригінали зберігаються у ***фонотеці***. Персонал фонотеки підбирає фонограми по замовленнях редакцій і для обміну з іншими центрами. Існують фонотеки для тривалого зберігання фондових (особливо цінних) фонограм і фонотеки для оперативної, поточної роботи.

З метою запобігання втраті або навіть розкраданню виданих фонограм останні копіюються безпосередньо у фонотеці або відтворюються на магнітофонах фонотеки, а електричні сигнали передаються по внутрішніх лініях радіобудинку у відповідні редакції або апаратні підготовки програм.

Особливу роль в діяльності радіобудинку (телецентру) відіграє ***апаратна реставрації фонограм*** (на рис. 3.3 не показано). У ній знаходяться технічні засоби для відновлення фонограм, які перестали задовольняти вимогам якості мовлення і запису. Реставруються фонограми, записані давно за допомогою низькоякісних пристроїв запису (наприклад, із завуженим спектром верхніх відтворних частот, з великими спотвореннями АЧХ, запис з іншою швидкістю і ін.), або фонограми з якістю, що погіршала, в результаті тривалого зберігання (збільшився рівень шумів, зріс копіреффект).

Для зменшення перерахованих відхилень використовуються *пристрої шумозаглушення, багатосмугові регулятори АЧХ, магнітофони з регульованою швидкістю руху носія запису, пристрою розширення спектру (ексайтери)*.

У ***трансляційну апаратну*** сходяться сполучні лінії від зовнішніх джерел програм - стаціонарних пунктів (радіо- або телевізійних) трансляцій, встановлених в театрах, концертних залах, стадіонах, площах міста, а також від пересувних радіо- і телевізійних станцій трансляцій (пунктів). Електричні сигнали з пунктів трансляцій через трансляційну апаратну поступають в апаратні запису або апаратні мовлення.

Центральна апаратна виконує функції комутаційного вузла радіобудинку або телецентру. Через неї сигнали зовнішніх джерел програм, поступаючих від АТС, міжміської АТС або трансляційної апаратної направляються в інші апаратні радіобудинку. Сигнали програм, що випускаються, безпосередньо або через коммутаційно-розподільну апаратну підприємств зв'язку поступають в тракт первинного розподілу програм (передавальним мовним станціям і центрам, міжміській мовній апаратній, міжнародній АТС, на центральну станцію проводового мовлення).

Основним завданням центральної апаратної є:

- з'єднання різних апаратних між собою;
- введення в сигнали програм позивних, сигналів точного часу та деяких службових сигналів;
- коригування АЧХ трактів від вхідних з'єднувальних ліній (при необхідності), наприклад, від стаціонарних трансляційних пунктів театрів, концертних залів, стадіонів, площ тощо;
- слуховий контроль сигналів звукового мовлення;

- забезпечення диспетчерської (службової) зв'язку зі службами радіодому і телецентру;
-контрольний запис сигналів вихідних програм і деяких службових переговорів (при необхідності).

Основним устаткуванням центральної апаратної є:

- комутатор передач;
- комутатор вихідних програм; на входах і виходах комутаторів передач і комутаторів вихідних програм встановлюються підсилювачі з глибоким негативним зворотним зв'язком, що забезпечують збереження технічних характеристик комутованих сигналів;
- комутатор запису;
- комутатор контролю; на комутатор контролю поступають всі сигнали з крайових підсилювачів, встановлених після комутатора вихідних програм; з виходу комутатора контролю сигнали подаються в апаратно-програмний блок або апаратну технічного контролю (якщо така є);
- датчики відеосигналів, пульт відеоінженера з контрольною і вимірювальною апаратурою (для телебачення);
- пристрої для введення в мовні програми сигналів єдиного часу.

Внутрішні і зовнішні лінії проходять через кросові стійки або шафи, де можуть здійснюватися неоперативні (напівоперативні) з'єднання (кросування) цих ліній. Структурна схема центральної апаратної представлена на рис. 3.4. З вхідної ***кросировочної стійки*** КС сигнали подаються їм вхідні блоки пульта центральної апаратної.

Блоки для регулювання сигналів від внутрішніх джерел радіодому і телецентру містять встановлюємі ***регулятори рівня*** (РУ) і ***підсилювачі***(У).Блоки для регулювання сигналів (що надходять по з'єднувальним лініям від зовнішніх джерел радіодому і телецентру) містять додатково ***коригувальні контури*** (КК) для корекції АЧХ. Далі сигнали від вхідних блоків подаються на ***вхідний комутатор*** $К_1$, тракти програм, що містять ***обмежувач максимальних рівнів***(ОГР) і на ***вихідний комутатор*** $К_2$, вихідну ***кросировочну стійку*** $КС_2$ і на вихідні лінії.

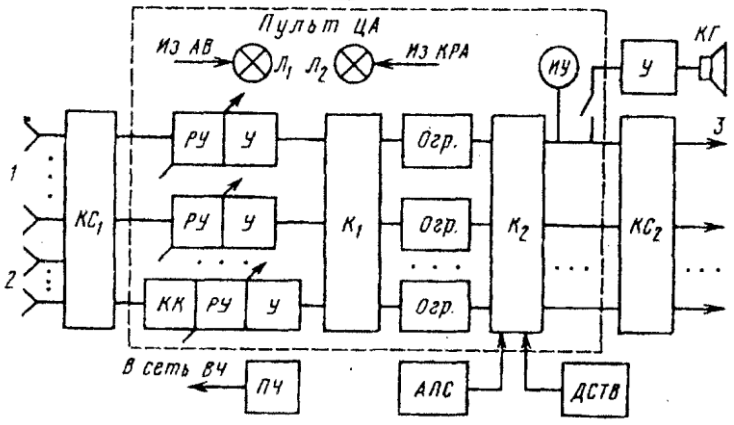


Рис.3.4. Структурна схема центральної апаратної

При цьому передбачається можливість розгалуження сигналів кожної з програм до кількох споживачів, зокрема, до центральної комутаційно-розподільчої апаратної.

Для зорового і слухового контролю в апаратній передбачаються ***вимірювачі рівня*** (ИУ) та ***контрольні гучномовні агрегати*** (КГ). Лампи $Л_1$ і $Л_2$ сигналізують про готовність апаратних мовлення та комутаційно-розподільчої апаратної до початку передачі.

В апаратній є електричний ***первинний годинник*** (ПЧ), від якого секундні імпульси надходять в мережу вторинних годинників, розташованих у всіх приміщеннях радіодому (телецентру, радіотелецентру) - студіях, апаратних, службових приміщеннях.

Для введення музичних сигналів розпізнавання програми мається ***апаратура позивних сигналів*** (АПС).

Від ***датчика сигналівточного часу*** (ДСТВ) вводяться сигнали перевірки часу. До цих же імпульсів підмішуються вимірювальні імпульси для автоматичного контролю стану трактів, оцінки коефіцієнта передачі, коефіцієнта гармонік і АЧХ.

У комутаторах $\mathbf{К_1}$ і $\mathbf{К_2}$крім двох проводів для сигналів програм одночасно комутуються допоміжні ланцюги 4-проводного телефонного зв'язку та передача сигналів розпізнавання (ідентифікації) програм.

У сучасних центральних апаратних широко використовується апаратура програмування перемикань за заздалегідь складеним розкладом, яке введено в пам'ять програмують пристрою. Можливість оперативного втручання в порядок і час перемикань зберігається.

Контроль технічної якості програм, що випускаються, здійснюється в ***апаратній технічного контролю радіобудинку*** (телецентру). Черговий відділу технічного контролю проводить контрольні прослуховування, перевіряє рівні мовних сигналів. Для фіксації випадків технічного браку і порушень норм (з метою вживання подальших заходів) в апаратній контролю встановлюються магнітофони і самописці, реєструючі контрольовані параметри.

Однією з важливих служб радіобудинку (телецентру) є ***служба збору, зберігання і обробки інформації*** (на рис.3.3 не показано), в яку безперервно вводяться матеріали, що поступають по телефонних, телеграфних, факсимільних і інших каналах. Працівники редакції мають можливість звертатися до баз інформації безпосередньо зі своїх робочих місць за допомогою терміналів. Передбачається переклад, реставрація, зберігання робочих матеріалів і їх оперативний вивід на дисплеї або друкуючі пристрої редакцій.

Персонал редакцій має можливість прослуховування і перегляду всіх програм мовлення, що створюються в радіобудинку (телецентрі) і отримуваних від зовнішніх джерел.

В інтересах створення програм з фондових фоно- і відеограм передбачається ***служба автоматизованого зберігання, пошуку і доставки фоно- і відеограм*** з фондів оперативного і довготривалого зберігання. Електричні сигнали з сховищ можна передавати безпосередньо в редакції або

відповідні апаратні.

Узгодження діяльності редакцій по розміщенню передач, що готуються, в сітці мовлення веде ***відділ координації***, а управління випуском програм - ***відділ випуску***. У відділі випуску є апаратна (або робоче місце) з комутатором для оперативного зв'язку з редакціями і апаратними мовлення. Диспетчер відділу випуску керує проведенням передач і контролює їх хід. У обумовлених випадках він ухвалює рішення про зміну сітки мовлення.

Умовами нормального функціонування радіобудинку (телецентру) є наявність:

1 служби часу, від якої електричні імпульси подаються на електричні годинники в апаратних, студіях, редакціях, відділах;
2 місцева АТС;
3 електропідстанція з надходженням електроенергії не менше ніж від двох трансформаторних підстанцій міської електричної мережі (іноді - зарезервована дизельною підстанцією);
4 установки кондиціонування повітря, опалювання і водопостачання.

Цілеспрямовані дії адміністративних служб радіобудинку (телецентру) полегшуються ***автоматизованою системою управління адміністративною і господарською діяльністю.*** Аналогічна автоматизована система полегшує управління роботою і технічних служб. З її допомогою можна відстежувати використання студій і апаратних, зайнятість персоналу в підготовці і проведенні передач.

На випадок форс-мажорних ситуацій можуть бути обладнані резервні апаратно-студійні блоки, забезпечені всім необхідним для роботи в автономному режимі.

3. Реверберaційні процеси в приміщеннях

Звукові поля в закритому приміщенні і у вільному просторі істотно відрізняються. *Звучання оркестру на відкритому повітрі набагато бідніше в тембральному відношенні, ніж в приміщенні з хорошими акустичними властивостями.*

Звукове поле в кожній точці приміщення-студії можна розглядати як результат накладення на сигнал прямої звукової хвилі від виконавця по найкоротшому шляху (прямий звук) і значного числа повторень, що запізнюються, обумовлених відбитими звуковими хвилями (відгомонами), що зазнали різне число віддзеркалень від поверхонь приміщення.

На рис. 3.5,а показано розповсюдження звукової хвилі в приміщенні.

На мікрофон, встановлений в приміщенні, впливають прямий звук і велике число відбитих звуків (відгомонів) (рис.3.5,б).

Внаслідок поглинання звукової енергії при віддзеркаленнях повторення, що запізнюються, мають менший рівень, ніж прямий звук. В середньому рівень цих повторень спадає із зростанням часу запізнювання, оскільки відгомони з більшою затримкою зазнають, як правило, і більше число віддзеркалень, і, отже, більше ослаблюються. Таким чином, відгомони відрізняються від

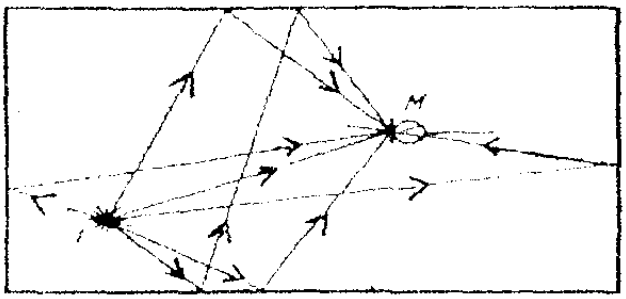
прямого звуку рівнем, спектральним складом, часом і напрямом приходу.

Сукупність цих відбитих звуків утворюють ***реверберaційний процес*** студії, рис. 3.5,в.

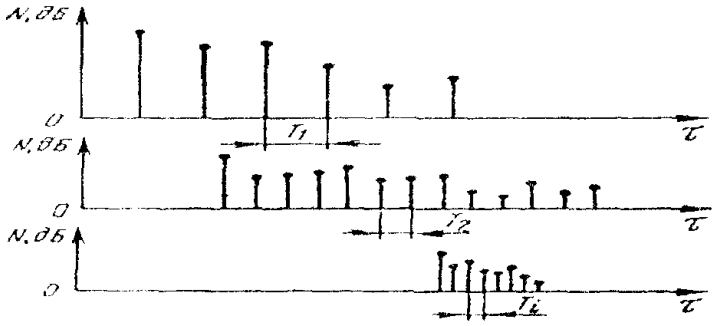
У початковій стадії часова структура реверберaційного процесу дискретна. Із збільшенням часу запізнювання відбитих сигналів їх кількість наростає, а часові інтервали між ними зменшуються. Рівень відгомонів з часом зменшується, і процес набуває флуктуаційний характер.

Початкова ділянка реверберaційного процесу дає інформацію про геометричні розміри приміщення, його об'єм і визначає просторовість звучання а також властиве приміщенню специфічне «забарвлення звучання».

а) розповсюдження звукової хвилі в приміщенні



б) три групи відгуків



в) повна часова структура ревербаційного процесу

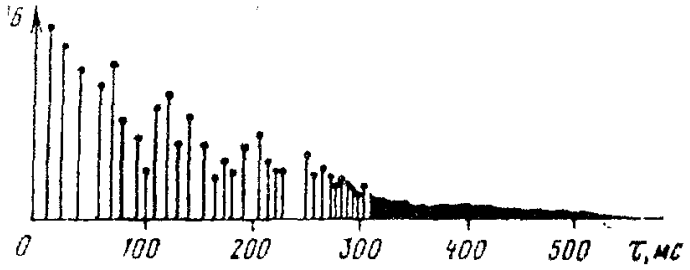


Рис. 3.5. Ревербаційний процес в приміщенні

Завершальна ділянка реверберaційного процесу характеризується

надходженням в кожен момент часу великого числа відбитих сигналів. Сигнали, що запізнюються, утворюють настільки щільну послідовність, що їх можна вважати такими, що зливаються один з одним. Ця ділянка визначає властиву приміщенню **гулкість звучання.**

Достатньо повного «перемішування» віддзеркалень можна чекати не раніше ніж через 100 мс, а у великих приміщеннях - і через 200 мс. Між сигналом прямого звуку і завершальною ділянкою реверберaційного процесу розташовуються ранні віддзеркалення. Їх інтенсивність, напрями приходу до слухача (записуючого мікрофону), час запізнювання по відношенню до сигналу прямого звуку визначають погані і хороші місця в залі. Картина ранніх віддзеркалень індивідуальна для кожного місця.

Відзначимо, що *слухачі концерту або опери сприймають лише від **5** до **20%** загальної енергії у вигляді прямого звуку.**10%*** енергій витрачається на завершальну ділянку реверберaційного процесу. Останні **70 ... 80%** - це енергія дискретних віддзеркалень.

У дискретній частині реверберaційного процесу слід розрізняти ***умовно ранні*** і ***пізні віддзеркалення***. Межа між ними лежить поблизу 50 мс для мови і 80 мс для музики. Перші (ранні) віддзеркалення в основному створюють ***ефект просторового сприйняття звучання мови і музики***. При звучанні музики максимальний ефект просторовості і прозорості звучання досягається, якщо перше віддзеркалення запізнюється по відношенню до прямого звуку приблизно на ***20…30*** мс, а перші три сигнали, що запізнюються, розміщуються в інтервалі ***45 ... 75*** мс. При звучанні мови висока розбірливість досягається, якщо перший сигнал, що запізнюється, приходить не пізніше ***10 ... 15***мс після сигналу прямого звуку, а перші три віддзеркалення - в інтервалі ***25...35*** мс. Збільшення часу першого запізнювання підсилює ефект просторовості звучання (але, як правило, знижує розбірливість). Відсутність ділянки дискретних віддзеркалень приводить до відчутного погіршення якості звучання.

Просторовість реверберaційного процесу є його найважливішою особливістю, істотно поліпшуючою сприйняття всіх його часових і часткових змін завдяки властивій слуху виборчій здатності по напрямку. Ця властивість вуха називається ***просторовим демаскуванням***.

З викладеного виходить, що оптимальне значення ***часу реверберації***, при якому передача сприймається найкращим чином, залежить від жанру програми, об'єму приміщення і частоти (довжини звукової хвилі, тобто шляху звукової хвилі, пройденого за період звукового коливання). Для двох основних видів мовних програм (мовних і музичних) це значення істотно відрізняється.

Час реверберації –час, за якийрівень звукузменшується на 60 дБ.

Залежність часу реверберації від об'єму студій показана на рис. 3.6.

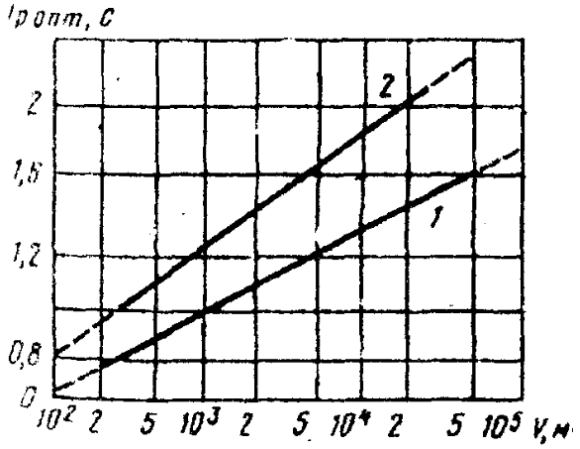


Рис. 3.6. Залежність часу реверберації від об'єму студій:
1 - для мовних студій;
2 - для музичних студій

Чим менший час реверберації, тим вища розбірливість мови. Але при дуже малому часі реверберації звучання стає дуже сухим, збіднює його в тембральному відношенні. І, навпаки, збільшення часу реверберації збагачує звучання, покращує чіткість і прозорість звучання, додає йому просторовість, об'ємність, гучність, але погіршує умови сприйняття смислової інформації при мовній передачі. Для дикторських студій час реверберації повинен залишатися практично постійним (0,3 ... 0,4 с) в смузі 125 ... 4000 Гц.

Оскільки низькочастотні компоненти спектру визначає в основному гучність звучання, *то зниження часу реверберації на низьких частотах певною мірою сприяє підвищенню розбірливості мови*. Тому в телевізійних студіях, де основним видом звучання є мова, рекомендується горизонтальна частотна характеристика часу реверберації в смузі 250 ... 4000 Гц з плавним спадом на більш низьких частотах, рис.3.7,а.

а) у мовній студії б) у музичній студії

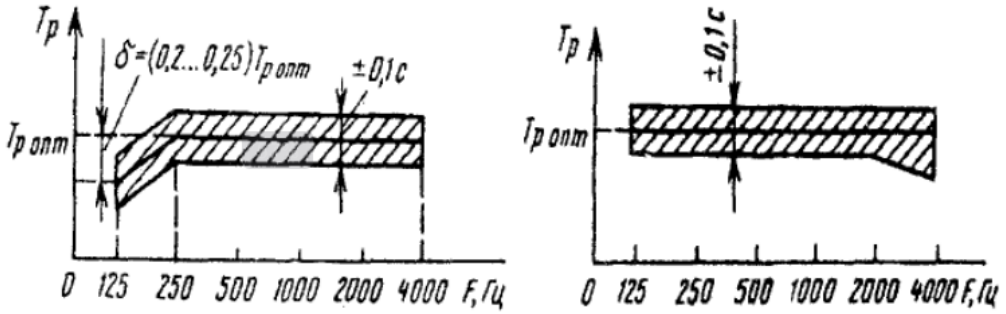


Рис. 3.7. Межі зміни стандартної реверберації

Вимоги до часу реверберації в літературно-драматичних студіях повинно бути більшими ніж в мовних, щоб передати все багатство відтінків мови актора. У літературно-драматичний блок радіобудинку зазвичай входить *заглушена студія*, призначена для створення різних ефектів, а також для запису передач, які за задумом режисера повинні відбуватися на відкритому повітрі. У таких студіях забезпечується мінімально можливий час реверберації (не більш 0,15с в

смузі 125 ... 4000 Гц).

У музичних студіях час реверберації $T_{опт}$ істотно більший, ніж в мовних. Це покращує мелодійність і виразність звучання. Тембри інструментів сприймаються багатшими, краще нюансованими, звучання набуває прозорість, ясність, чіткість, об'ємність. Для музичних студій перевага віддається залежності, приведеній на рис.3.7,б.

Частотна характеристика часу реверберації повинна бути такою, щоб окремі складові складного звучання не могли б за рахунок реверберації підкреслюватися або пригнічуватися.

Накопичений досвід по вивченню впливу частотної характеристики часу реверберації на якість звучання знайшов віддзеркалення в нормативних документах. Перераховані чисто якісні характеристики звучання для їх реалізації повинні бути пов'язані з кількісними технічними параметрами часу реверберації, а час реверберації - з параметрами студії (формою і об'ємом, різними звукопоглинальними властивостями покриттів підлоги, стін і стель, відбивних панелей і тому подібне). В даний час широко застосовуються пристрої штучної реверберації, для створення якої в деяких студіях використовується луна-камера.

<u>Примітка.</u> *Іноді у складі літературно-драматичного блоку передбачається гучна студія (кімната «луни»), така, що виконує функцію пристрою* ***штучної реверберації****. Це - приміщення з непаралельними стінами, підлогою і стелею, що добре відображають звук. Час реверберації луна-камери може складати до 5 с.*

На рис.3.8 приведена схема підключення ехо-камери до тракту звукопередачі.

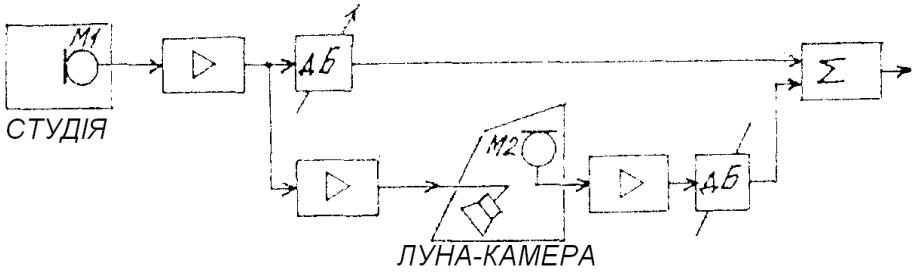


Рис. 3.8. Схема підключення ехо-камери до тракту звукопередачі

Звукові коливання із студії по електричному ланцюгу (мікрофон $М_1$ - мікрофонний підсилювач і потужний підсилювач) передаються в луну-камеру через гучномовець. Відбиті звуки, що характеризують реверберацію приміщення, сприймаються мікрофоном $М_2$, потім посилюються і подаються на змішувач основного і реверберуючого сигналів.

Залежно від співвідношення реверберуючого і основного сигналів, що встановлюється за допомога регуляторів їх рівня, сумарний сигнал сприйматиметься з різним реверберацiйним ефектом. Недоліком луна-камери є відсутність практичної можливості регулювання її часу реверберації.

Використаний вище термін «час реверберації» потребує пояснення методу його вимірювання. Нормативними документами передбачено *два методи*

вимірювання часу реверберації, що відрізняються видом досліджуваного сигналу.

За першим методом (рис. 3.9,а) широкосмуговий шум з виходу генератора шуму пропускається через октавний (або третьоктавний) смуговий фільтр і підсилювач. Вихід цього підсилювача підключається до всеспрямованого гучномовця, розміщеного в обстежуваному приміщенні студії. Випромінений в студії шумовий сигнал фіксується вимірювальним мікрофоном. Після мікрофонного підсилювача шумові коливання поступають на аналогічний набір смугових фільтрів і самописець.

Якщо до моменту t_0 вимикач замкнутий, то на стрічці самописця записується стаціонарний сигнал постійного рівня, що умовно приймається за 0 дБ, рис. 3.9,б. Спостережувані на стрічці флуктуації визначаються природою випробувального коливання.

При розмиканні вимикача у момент t_0 починається процес реверберaційного спаду рівня звукового тиску на вході мікрофону до значення, визначуваного рівнем звукового фону в студії (наприклад, менш -35дБ). Цей процес апроксимується похилою прямою лінією. При відомій швидкості руху стрічки самописця по цьому графіку визначається часовий інтервал т, протягом якого рівень звукового тиску зменшується від -5 до -35 дБ, тобто на 30 дБ. Шуканий час реверберації приймається рівним 2τ.

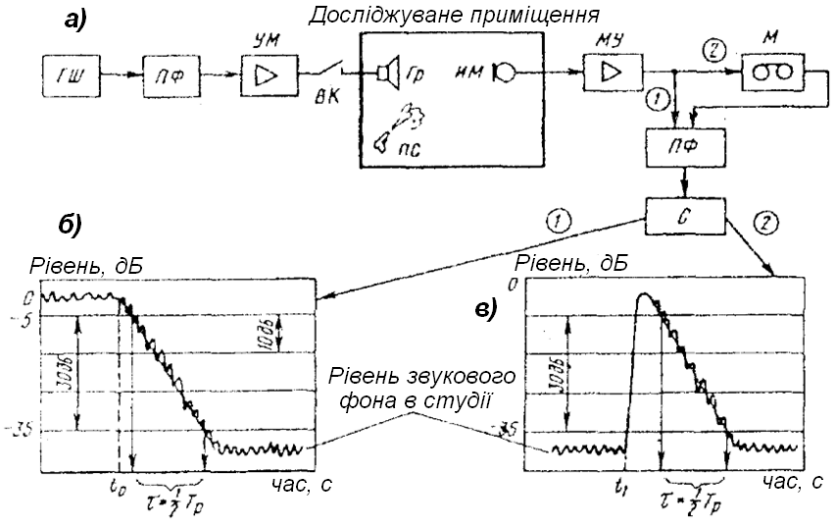


Рис. 3.9. До пояснення методу вимірювання часу реверберації

Процедура вимірювання послідовно повторюється для всього комплекту смугових фільтрів у встановленій смузі частот звукових сигналів (наприклад від 125 до 4000Гц) для декількох положень вимірювального мікрофону. Отримані результати усереднюються.

Другий метод вимірювання часу реверберації заснований на використанні імпульсного випробувального сигналу. Як «імпульсний звук» використовується постріл стартового пістолета або іскровий розряд. Імпульсний відгук студії на такий сигнал фіксується вимірювальним мікрофоном, посилюється мікрофонним підсилювачем, а потім записується на магнітофон. Кожен записаний сигнал фіксується на стрічці самописця. Підключення різних

смугових фільтрів дозволяє визначити час реверберації в окремих інтервалах досліджуваної смуги звуковихсигналів. Так досліджується залежність часу реверберації для різних звукових частот.

Зроблений запис обробляється в лабораторних умовах за допомогою тієї ж апаратури, що і в першому методі. До моменту часу t_1(рис.3.9,в) на стрічці фіксувався рівень звукового фону студії. У момент пострілу t_1 рівень різко зростає, а потім починається процес реверберaційного спаду. Шуканий час реверберації розраховується також як і в першому методі.

Схемотехніка сучасної апаратури для оцінки часу реверберації студій - мікропроцесорна. Час реверберації вимірюється автоматично. Результат представляється відразу в цифровій формі (секундах або долях секунд).

Є методи для оцінки додаткових критеріїв (чіткість, прозорість, гучність, просторове враження і ін.) акустичної якості студійних приміщень і методи вимірювання цих параметрів за допомогою ЕОМ.

4. Технологія формування програм звукового мовлення

Для кращого розуміння функціонування студійного устаткування корисно мати уявлення про технологію формування програм мовлення. Проілюструємо це на прикладі технології формування програм звукового мовлення.

Створення програм мовлення - складний творчий, технічний і технологічний процес, в якому беруть участь великі колективи програмних і технічних працівників. У їх розпорядженні знаходяться:

- пристрої прийому зовнішньої інформації, яка поступає в студію по телефонних сполучних і абонентських лініях, по каналах телеграфного і факсимільного зв'язку, і виходи ліній від внутрішніх джерел (з інших апаратних радіобудинку) - із фонотеки, із банку інформаційних даних (які зберігаються в пам'яті ЕОМ) і ін.;
- пристрої регулювання і перетворення електричних сигналів мовлення.

Одні з цих пристроїв служать для формування художнього образу програми, збагачення звучання, введення звукових ефектів. Інші призначені для того, щоб сформувати електричні сигнали, які задовольняють технічним вимогам.

Так, нормуються: максимальний рівень сигналу (що приймається за 0 дБ, відповідний найгучнішим сигналам) і менш жорстко - мінімальні рівні (не менше -25 дБ для музики -14 дБ для художнього читання і драматичних постановок -10 дБ для мовних інформаційних передач). Допустимі і менші рівні, але їх тривалість не повинна перевищувати 3 с. Виконання цих вимог забезпечує нормальне функціонування устаткування трактів формування, первинного і вторинного розподілу електричних сигналів програм.

Для отримання якнайкращого художнього результату звукорежисер заздалегідь знайомиться із звуковим матеріалом, який підлягає запису і виражений у формі партитури або сценарного плану, користується виробленими практикою прийомами регулювання рівнів і спектру, звуковими ефектами.

Звукорежисерові важко одночасно вирішувати творчі завдання і підтримувати в заданих межах електричні рівні сигналів. Щоб зняти з нього чисто технічні обов'язки рекомендується (і це реалізується) використовувати автоматичні регулятори рівня (АРР), зокрема комбіновані. Проте їх застосування припускає розуміння звукорежисером принципів їх дії, можливостей, областей застосування. Недотримання цього правила (наприклад, установка органів АРР «на око») не приводить до бажаної якості продукції, яка випускається, що може привести до необачного виводу про непридатність даних регулювань.

Сучасна технологія формування частин програми заснована на роздільному записі електричних сигналів, джерелами яких є мікрофони, аналогові або цифрові музичні інструменти (музичні синтезатори). Це робиться для того, щоб незалежно регулювати сигнали кожного джерела.

Перед кожним виконавцем або групою виконавців встановлюється свій мікрофон. Для кращого розділення сигналів (при записі) іноді деяких виконавців разом з їх інструментами поміщають в окремі звукоізольовані кабіни.

Різні складові ансамблевого звучання (голоси солістів, партії окремих інструментів, звучання окремих груп і хору) записуються на різні доріжки стрічки багатодоріжкового магнітофону.

Партії різних виконавців при необхідності записуються навіть в різний час. Можна записати партію виконавця, не займаючи інших учасників ансамблю. Це вигідно економічно і навіть надає ширші можливості для створення якнайкращого варіанту звучання.

Для кращого перекриття (перевищення) рівня шумів апаратури магнітного запису максимальний рівень електричного сигналу кожного джерела спочатку встановлюється максимальним (0 дБ) для даного магнітофона. Надалі при зведенні (змішуванні) електричних сигналів різних джерел в загальну фонограму звукорежисер спільно з керівником ансамблю ухвалює рішення про бажане співвідношення гучності (музичний баланс) окремих інструментів, голосів солістів і оркестрових груп.

Частини музичного твору записуються в різних варіантах. У остаточну фонограму включається кращий в художньому і технічному відношенні варіант.

При формуванні стереофонічного сигналу регулюванням рівнів в каналах «правий - П» і «лівий - Л» створюється бажане розташування уявного розташування звуку (УРЗ) на лінії бази гучномовців.

5. Апаратно-студійний блок. Апаратні радіодому. Класифікація студій

5.1 Апаратно-студійний блок

До складу апаратно-студійного блоку входить власне ***студія*** і ***студійна апаратна***, рис.3.10.

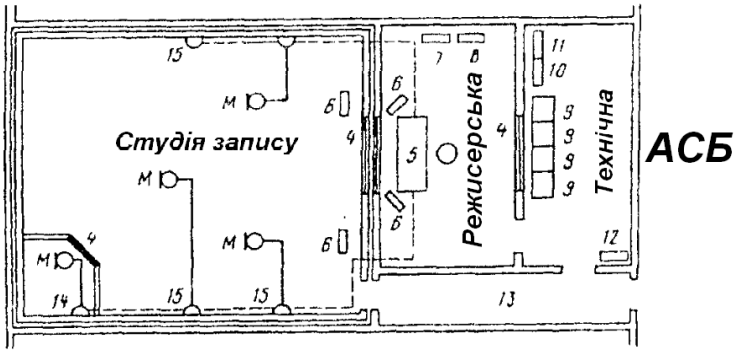


Рис.3.10. Склад апаратно-студійного блоку

Іноді обладнується дві апаратні - ***апаратна запису*** і ***апаратна мовлення***, які відрізняються складом устаткування.

В ***апаратній запису*** частіше використовуються багатодоріжкові магнітофони. Це дозволяє роздільно записувати партії окремих інструментів або груп інструментів, а потім об'єднувати («зводити» фонограми, вводячи при цьому в кожен тракт свої перетворення сигналів і регулюючи співвідношення «звучностей» інструментів і груп інструментів). Звучання солістів може бути записане пізніше, але синхронно із звучанням акомпануючого ансамблю. У апаратній мовлення для швидкого введення в передачу сигналів від різних зовнішніх джерел (пункту трансляції, АТС, міжміської АТС) розміщується стійка оперативної комутації.

Для спокійної роботи режисера (звукорежисера, диктора) його приміщення (іменоване «режисерською», дикторською) відділяється від студії, а іноді і від технічної апаратної.

У *режисерській* розміщується пульт звукорежисера 5, контрольні гучномовні агрегати 6, стійки звукових ефектів і керуючої ЕОМ 7,8.

У технічній розташовуються магнітофони 9, стійки комутації і вимірювань 10,11, щиток електроживлення 12.

Студійне приміщення звукоізольоване, але має візуальний зв'язок з режисерською і кабіною виконавців через звуконепроникні оглядові вікна 4. Слуховий зв'язок між цими приміщеннями здійснюється по сполучних лініях.

Для поліпшення звукоізоляції (зниження звукового фону) студія пов'язана з апаратною і іншими приміщеннями (для зберігання інвентаря, декорацій і ін.) через тамбури 13.

При апаратній мовлення обладнуються кабіни, призначені для прийому питань від слухачів, тобто для діалогу із слухачами, а також кабіни для

виконавців 14.

Інтер'єр більшості студій відрізняється від звичних музикантам інтер'єрів концертних залів і відкритих естрадних майданчиків. Замкнутість об'єму студій викликає у деяких виконавців відчуття, подібне до клаустрофобії - боязні закритого простору. Це може позначатися на емоційному стані виконавців. Так же гнітюче діє знаходження в невеликому замкнутому просторі і на персонал апаратних.

Щоб виключити негативний вплив замкнутого простору, студію можна візуально «пов'язати» з навколишнім простором: великі звуконепроникні вікна студії виходять в тихий зелений дворик або парк з штучною водоймою, водоспадом або фонтаном. Розкриттю замкнутості сприяє і проектування на встановлені в студії екрани зображення природних або живописних пейзажів. Ідея вже реалізується на практиці.

Основним мовним устаткуванням студій є студійні мікрофони, пульт звукорежисера (диктора), контрольні гучномовні агрегати. Останні дозволяють виконавцям прослухати тільки що зроблений запис і при необхідності змінити характер виконання.

Встановлювані в студії (рис.3.10) мікрофони зв'язані гнучким екранованим кабелем з мікрофонними розетками 15. Мікрофонні ланцюги від розеток до пульта прокладені в сталевих трубах. Вони захищають мікрофонні ланцюги від магнітних полів, що створюються освітлювальною системою студії.

Пульт диктора призначений для включення дикторського мікрофону і оптичної сигналізації про готовність («готовий») і включення мікрофону («мікрофон включений»). Включення мікрофонів - кнопкове. При включенні дикторського мікрофону автоматично відключається ланцюг контрольного акустичного агрегату.

Пультом є стіл, на якому знаходяться два мікрофони, кнопки включення мікрофону і дистанційного включення магнітофонів, сигнальні лампи, телефонний апарат з оптичним викличним сигналом.

Стіл диктора покривається щільною тканиною для запобігання інтерференції звуку, що йде безпосередньо від рота диктора до мікрофону, і звуку, відбитого від поверхні столу. Так усуваються можливі частотні спотворення, що викликаються інтерференцією..

Для зменшення впливу магнітних полів зовнішніх джерел на мікрофонний кабель, що йде в студійну апаратну, рівні сигналу збільшуються мікрофонними підсилювачами.

Для уникнення надмірних рівнів мовного сигналу, що подається в подальший тракт, передбачається обмежувач максимальних рівнів. Інтенсивності звуку голосів дикторів (і інших виступаючих) неоднакові.

Для вирівнювання рівнів в пульт вбудовується стабілізатор середнього рівня, посилення якого встановлюється в режимі «Репетиція», коли диктор протягом 5...6 секунд вимовляє декілька слів. При цьому керуючий ланцюг автоматичного регулятора «запам'ятовує» рівень сигналу і відповідним чином регулює посилення стабілізатора рівня. Після натиснення кнопки «Мікрофон включений» регулятором підтримується незмінним встановлений середній

рівень.

Диктор підтримує двосторонній зв'язок із студійною апаратною, відділом випуску, редакцією, іншими службами. Для переговорів використовується інший мікрофон пульта.

На стіні студії встановлюються сигнальні написи, що світяться, «Репетиція», «Приготуватися», «Мікрофон включений», а також безшумний електричний годинник з годинною, хвилинною і секундною стрілкою.

Пульт звукорежисера призначений для обробки мовного сигналу - регулювання рівня, змішування сигналів («мікшування»), зміни частотного спектру сигналу і так далі. За допомогою пульта виконуються і допоміжні операції - дистанційний запуск магнітофонів, дистанційне керування реверберaторами, оптична сигналізація. Залежно від призначення пульти звукорежисера мають різні можливості.

Структура пультів по мірі розвитку звукового мовлення і появи сучаснішої елементної бази ускладнювалася. Перші пульти були поєднанням декількох вхідних трактів з індивідуальними регуляторами рівня і одного вихідного тракту із загальним регулятором.

З підвищенням рівня художності музичних передач збільшувалося число вхідних і вихідних трактів. Окрім регуляторів рівня пульти почали оснащувати регуляторами тембру. Операції регулювання і перетворення сигналів почали виконуватися не тільки в аналоговій, але і частково або повністю дискретній (цифровий) формі. Пульти стали багатофункціональними.

Як пристрої регулювання і перетворення сигналів почали використовуватися універсальні або функціональні процесори, керовані спеціальними програмами.

Число вхідних трактів досягає декількох десятків, проміжних від 4 до 10, вихідних - від 2 до 6.

Існують пульти, в яких число вхідних, проміжних і вихідних трактів однакове. До виходу пульта підключається багатодоріжковий магнітофон. З його допомогою формуються і редагуються частини програми.

Сучасні пульти мають вільно формовану, гнучку структуру, спрощена схема якої представлена на рис.3.11.

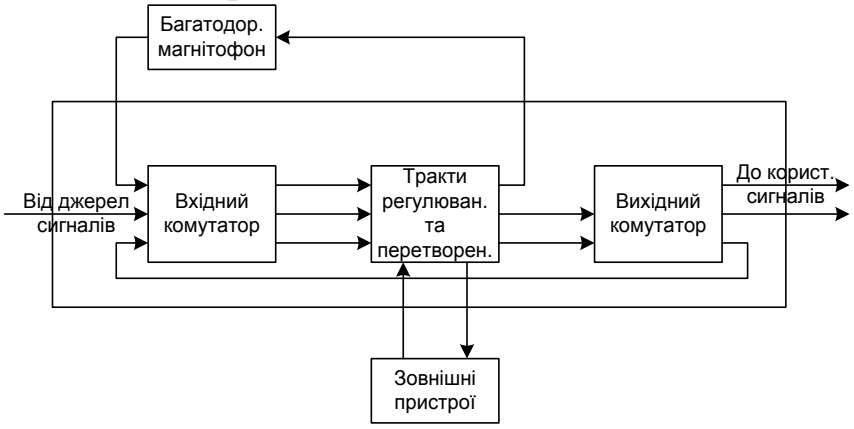


Рис.3.11. Спрощена схема вільно формованої гнучкої структури сучасного пульта

Будь-який тракт може бути підключений до зовнішніх пристроїв або

багатодоріжкового магнітофона.

Вже випускаються повністю «цифрові пульти». Вони містять АЦП і ЦАП та пристрої перетворення цифрових стандартів. Пристрої регулювання і посилення сигналів кожного тракту пульта об'єднуються конструктивно в касети («лінійки»).

Тракти не мають чіткого призначення. Будь-який тракт може бути використаний як вхідний, проміжний або вихідний. Вони можуть з'єднуватися в бажаній послідовності через вхідний і вихідний комутатори.

Кожна касета містить сполучені ланцюжком вхідний регулятор чутливості із ступінчастою зміною згасання в межах 60 дБ через 10 дБ, регулятор рівня з плавною зміною згасання в межах від нуля до 60 ... 80 дБ і положенням «відключено», іноді - стереорегулятори, блок регуляторів частотних характеристик (регуляторів тембру) або трьох- (або чотирьохсмуговий) еквалайзер, мікрофонний і розділовий підсилювачі, розвинену систему комутації і контролю, що містить індикатор перевищення максимального рівня або простий візуальний індикатор рівня (світлодіод).

Зовнішні пристрої звукових ефектів (наприклад, ревербератор) включаються в розрив ланцюга зазвичай до регулятора рівня.

До входу касети (перемикачем) підключаються три основні джерела - мікрофон студії, лінії з високим рівнем сигналів від інших апаратних і магнітофона, генератор звукових частот (для настройки і контролю пульта). Вихід касети з'єднується з пристроєм комутації. Для контролю до виходу касети можна підключати основні індикатори рівня і контрольні гучномовці. У касетах деяких пультів містяться два регулятори рівня. Один призначений для регулювання в процесі запису. Другий використовується (не чіпаючи першого) при зведенні фонограм в процесі редагування і формування програми.

На вході і виході цифрових фільтрів включені відповідно АЦП і ЦАП і перетворювачі цифрових форматів.

Органи управління пультом умовно класифікуються на оперативні (регулятори рівня) і неоперативні (регулятори АЧХ. пристроїв звукових ефектів, комутаційних пристроїв).

Загальне число органів досягає декількох сотень. Частка неоперативних органів досягає ***90 ... 95%*** від загальної кількості. Тому найбільш трудомістка і складна підготовка пульта до дії - установка неоперативних органів управління в початковий стан. Вона займає значну частку часу звукорежисера.

Традиційне положення неоперативних органів записувалося на папері. У сучасних пультах для цієї мети використовується електронна пам'ять з автоматичною установкою органів управління в задані на репетиції положення.

На жаль, прагнення розширити функціональні можливості пультів може привести до зворотнього ефекту, забороні творчих можливостей звукорежисера, оскільки він виявляється не в змозі управляти численними рукоятками, кнопками, клавішами і навіть не завжди знає їх призначення.

Існує декілька напрямів в комплектуванні студійних апаратних пультами звукорежисера магнітофонами, пристроями звукових ефектів, синтезаторами звуку. Разом з апаратними, в яких встановлено тільки аналогове устаткування, є

апаратні «гібридного» типу з аналоговими пристроями і цифровим управлінням, а також повністю цифрові. Вибір того чи іншого рішення визначається, переважно економічними, міркуваннями.

Приклад побудови апаратно-студійного блоку (АСБ) з аналоговим устаткуванням показаний на рис.3.12.

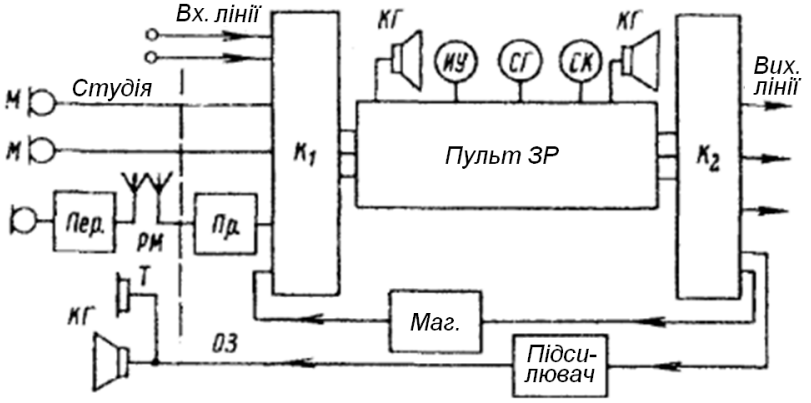


Рис.3.12. Приклад побудови АСБ з аналоговим устаткуванням

Сигнали із студії від мікрофонів (М) поступають в студійну апаратну (СА) по мікрофонних кабелях або через тракт радіомікрофону (РМ), що містить радіопередавач (Пер) (наприклад, дециметрового діапазону) і радіоприймач (Пр). Окрім сигналів із студії через комутатор ($К_1$) до пульта режисера підводяться сигнали із інших апаратних радіобудинку, а також від зовнішніх джерел (наприклад, з пункту трансляції концертного залу).

Для суб'єктивного і об'єктивного контролю результатів регулювання в тракті сигналу служать контрольні гучномовці (КГ) на вході і виході пульта, вимірники рівня, стереогоніометр (СГ) і стереокоррелометр (СК). Останні два прилади служать для перевірки правильності фазування сигналів при передачі стереосигналів і оцінки сумісності сигналів стереопари. Через вихідний комутатор ($К_2$) сигнали прямують до магнітофону (Маг), в систему озвучування студії (ОЗ), в центральну апаратну і інші апаратні.

Спрощена структура цифрового устаткування АСБ приведена на рис.3.13. Сигнали на вході і виході устаткування можуть бути представлені в аналоговій або цифровій формі. У останньому випадку вони повинні відповідати Рекомендації МСЕ-Р 647. У цьому ж форматі з'єднуються окремі функціональні пристрої всередині АСБ - магнітофони, програвачі компакт-дисків, пристрої звукових ефектів.

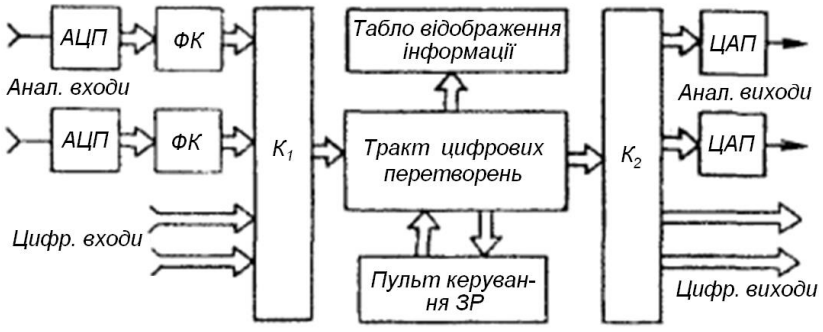


Рис.3.13. Спрощена структура цифрового устаткування АСБ

Сигнали аналогових джерел (мікрофонів, магнітофонів, від сполучних ліній) заздалегідь подаються на АЦП, потім перетворюються у формувачі коду (ФК) в код апаратної.

Сигнали, що поступають на аналогові пристрої (магнітофони, гучномовні агрегати і ін.) пропускаються через ЦАП. Від деяких цифрових пристроїв можуть поступати сигнали з частотою дискретизації, що відрізняється від стандартної в пульті. Тому спочатку проводиться передискретизація цих сигналів, а потім вони перетворяться у формат коду апаратної (48 кГц).

Примітка. *Цифрове устаткування потребує ЕОМ і відповідного програмного забезпечення. Заявлені виробником можливості реалізуються не завжди. Міняючи програму, ЕОМ може діяти як система АРП (автоматичного регулювання посилення), для підтримки постійності рівня сигналу, як аналізатор спектру, багатоголосий регулятор тембру (еквалайзер). Проте одночасно вказані функції виконуватися не можуть (а фірми-виробники про це передбачливо замовчують). Проте окремі (не універсальні) аналогові пристрої, загальна вартість яких у багато разів менша цифрового універсального, можуть бути включені до тракту одночасно і виконувати різні завдання.*

І ще: рекламовані параметри цифрових пристроїв не завжди відповідають дійсним. Так, часто оголошуваний виробниками динамічний діапазон 90 ... 96 дБ зазвичай є відношенням сигнал/шум квантування. Якщо, наприклад, встановити (як це прийнято) запас на перевищення номінального рівня 6 ... 10 дБ. а запас на перевищення рівня шуму квантування 20 ... 25 дБ. то реальний динамічний діапазон цифрової апаратури складе близько 55 ... 65 дБ, що цілком досяжно і в аналоговій апаратурі.

Викладене не означає, що цифрове устаткування гірше аналогового. Приведені приклади лише показують, що не завжди витрати па цифрову апаратуру виправдовуються. Часто вигідніша «гібридна» побудова, при якій перетворення сигналів ведуться аналоговим способом, а управління і контроль - цифровим. Подібне рішення, як правило, скорочує витрати.

5.2 Апаратні радіодому

Апаратно-програмний блок і апаратна мовленнярадіобудинку.У апаратно-програмному блоці (АПБ) або апаратній мовлення радіодому (телецентру) *формуються передачі і програми в цілому з окремих раніше підготовлених частин*. Згадувані частини, як правило, вже пройшли повне звукорежисерське регулювання, монтаж, редакційну «правку» і атестовані службою технічного контролю. Тому *складного регулювання та перетворення сигналів у досліджуємих апаратних не передбачено.*

Устаткування в цих апаратних простіше, ніж у аппаратпо-студійних блоках. Проте тут використовується обладнання для автоматизації випуску програм і відображення інформації в джерелах програм та стан тракту.

Формування програм здійснюється перемиканням джерел або перемиканням з накладенням одного сигналу на інший (наприклад, музичного на мовний). Обладнання АПБ в радіодомі може розміщуватися в режисерських і технічних апаратних. Дистанційне управління цифровими трактами реалізується відповідно доДокументу 3245 радіомовного Європейського союзу.

Трансляційні пункти і пересувні звукові станції. У звуковому і телемовленні широко застосовуються трансляційні пункти (ТП), що перевозяться і переносяться технічні засоби, призначені для формування окремих частин програми.

Залежно від важливості об'єкта і частості передач обладнуються *стаціонарні або напівстаціонарні* ТП. У першому комплект обладнання встановлюється постійно, по-друге - на час проведення передач.

Стаціонарні ТП призначені для проведення регулярних трансляцій або записів. Вони обладнуються в театрах, концертних залах, великих спортивних спорудах. Вони з'єднуються з радіодомом (телецентром) постійними лініями зв'язку (радіорелейними або кабельними) для передачі сигналів мовлення та службової (диспетчерської) зв'язку.

У спеціально обладнаних приміщеннях ***напівстаціонарних ТП***обладнання, щоперевозиться або переноситься, встановлюється тільки на час трансляції. Якщо надійних ліній зв'язку з радіодомом (телецентром) немає, перевага віддається запису шматка програми на місці (у приміщенні напівстаціонарного ТП) з наступною доставкою запису.

Для стаціонарного ТП в будівлі видовищного підприємства обладнується звукоізольоване приміщення, пов'язане із залом великим оглядовим вікном, і обладнане системою кондиціювання повітря. Приклад планування такого пункту наведено на рис.3.14.

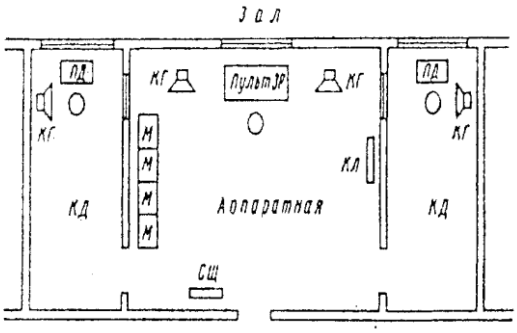


Рис. 3.14. Приклад планування стаціонарного трансляційного пункту

В апаратній розміщені:
- Пульт звукорежисера,
- Контрольні гучномовні агрегати (КГ),
- Магнітофони (М),
- Стійка комутатора ліній (КЛ),
- Силовий щиток (СЩ).

Трансляційний пункт повинен одержувати електроживлення безперебійно. Тому повинен мати не менше двох вводів від різних трансформаторних підстанцій.

На малюнку представлені: дві кабіни диктора (КД) і приміщення з пультом для звукорежисера (ЗР).

В одній кабіні площею 3...4 м^2 обладнаної пультом диктора і гучномовним агрегатом, знаходиться диктор або коментатор, що дає пояснення у перервах і по ходу вистави або концерту. У другу кабіну

запрошуються співрозмовники (наприклад, режисер вистави чи концерту, виконавці, слухачі і глядачі) для висловлювань про зміст і час постановки.

Особливістю трансляції вистав і концертів, є наявність великої кількості мікрофонів, включаючи радіомікрофони. Наприклад, в оперному театрі мікрофони встановлюються в оркестрі, у рампи, з боків сцени і в її глибині. Для підвищення надійності іноді встановлюється два комплекти обладнання. Тому пульти апаратної мають велике число вхідних (від мікрофонів) трактів (наприклад, 32) та декілька незалежних вихідних трактів. Іноді тракти розділені на дві групи і живляться від двох різних випрямлячів.

Ще більш складну структуру має устаткування телевізійних трансляційних пунктів, оскільки містить тракти формування сигналів звуку та зображення.

Пересувні технічні засоби формування, запису й передачі сигналів частин програм звукового і телевізійного мовлення розміщуються в спеціально обладнаних автобусах. До переліку цих засобів входять:

- ***Пересувні телевізійні станції,***
- ***Пересувні станції магнітної відеозапису,***
- ***Репортажні пересувні телевізійні станції,***
- ***Пересувні звукові станції,***
- ***Тележурналістський комплекс.***

Перераховані кошти розрізняються устаткуванням і технологічними можливостями.

Так, доскладу***пересувної телевізійної станції*** входить телевізійне обладнання, радіорелейна станція та допоміжне обладнання. З його допомогою регулюються вихідні сигнали, записуються на магнітну стрічку і передаються в трансляційну апаратну телецентру. Пересувна станція відеозапису містить той самий комплекс обладнання, крім радіорелейного станції, і діє звичайно спільно з пересувною телевізійною станцією.

У ***репортажні пересувні телевізійні станції*** входить телевізійне та звукове обладнання, що відрізняється портативністю і малим часом розгортання (портативні телевізійні камери і відеомагнітофони). ***Устаткування пересувної звукової станції***, інакше іменованої автозвукопересувкою, призначене для творчого і технічного регулювання сигналів звуку, їх запису й передачі по лініях зв'язку в трансляційну апаратну радіодому (або телецентру).

Тележурналістський комплекс- це переносне звукове та телевізійне обладнання, призначене для оперативного запису звуку і зображення за допомогою портативного відеомагнітофона, поєднаного з телевізійною камерою. Для чисто звукового репортажу використовуються репортерські магнітофони. Іноді в комплекс входять і радіомікрофони.

5.3Класифікація студій

Студією називається приміщення, спеціально призначене для виконання мовних і музичних фрагментів мовних програм.

Із студії починається система звукового (телевізійного) мовлення. Для виконання мовних програм різних жанрів студії повинні володіти неоднаковими акустичними властивостями. Тільки в цьому випадку може бути досягнута максимально можлива (з погляду слухового сприйняття) якість звучання. Дійсно, рівні звукового тиску, напрямів розповсюдження акустичної енергії і ін. визначаються не тільки характеристиками джерела звуку (розглянутими вище), але і геометричними розмірами, формою приміщення, здатністю стін, підлоги і стелі поглинати (або відображати) енергію акустичних хвиль.

По аналогії з джерелами звуку як резонаторами (скрипка «без дна» не звучить) студія є замкнутим повітряним об'ємом, коливальною системою з розподіленими параметрами.

Форми великих студій звукового і телевізійного мовлення такі ж різноманітні, як і форми великих концертних залів. Їх вибирають, виходячи з архітектурно-будівельних міркувань і зручності розміщення оркестрантів на сцені (ігровому майданчику).

Ці студії мають, як правило, місця для розташування слухачів.

Студії середніх і малих розмірів найчастіше мають форму прямокутного паралелепіпеда, довжина *d*, ширина *b* і висота *h* якого приблизно знаходяться в співвідношенні так званого «золотого перетину» d/b = b/h при d = b + h.

Особливо важливий правильний вибір висоти студії. Навіть у найбільших студіях (об'ємом більше 10000 $м^3$) висота не повинна перевищувати 14 м. Звукорозсіювальні конструкції підвішуються над оркестром на висоті 6 ... 8 м. але не менше 3 м.

Об'єм студії знаходиться в прямій залежності від максимального числа виконавців. Питомий об'єм на одного оркестранта повинен бути не менше 10 ... 18 $м^3$. Площа підлоги студії на одного виконавця повинна бути не менше 1,8 ... 3$м^2$. Скупчене розташування оркестру дезорієнтує музикантів, утруднює виконання і підвищує психологічне навантаження і, як наслідок, приводить до швидкої їх стомлюваності і втрати контролю над якістю виконання.

У малих приміщеннях (об'ємом менше 150 $м^3$) для дикторських мовних студій, кімнат прослуховування і апаратних площа підлоги повинна бути не менше 25 $м^2$. При цьому спектр власних частот малих приміщень повинен бути по можливості рівномірним.

Окрім мікрофонів в студії може розміщуватися реквізит для виконавців, великогабаритні музичні інструменти (рояль), стаціонарні музичні інструменти (орган), табло з написом «Мікрофон включений», пристрій для телевізійного і гучномовного зв'язку з апаратною. У телевізійних студіях додатково обладнуються сценічні майданчики з декораціями, а також розташовуються телевізійні камери і освітлювальна апаратура. Основні типи студій, їх призначення і габарити представлені в табл. 3.1.

Для виконання мовних програм різних жанрів студії повинні володіти неоднаковими акустичними властивостями. Тільки в цьому випадку може бути досягнуте необхідна якість звучання (з погляду слухового сприйняття або запису).

Студія є замкнутим об'ємом, який істотно впливає на часову структуру сигналу джерела звуку, відчутно змінюючи забарвлення звучання.

Таблиця 3.1. Основні типи студій звукового мовлення

Назва студії	Призначення	Число виконавців	Висота, м	Площа підлоги, $м^2$
Велика музикальна	Музичні передачі великих форм (класична музика у виконанні симфонічних оркестрів, хоровий спів і т.п.) із можливістю присутності слухачів	до 250	13	1000
Те ж, тільки без слухачів	–	150	12	750
Середня музична	Симфонічна музика (середніх по числу виконавців оркестрів)	40 ... 65	8,5 ... 10	350 ... 450
	Запис естрадної та джазової музики	35 ... 60	8,5 ... 10	350 ... 450
Мала музична	Запис невеликих оркестрів и хорів	30 ... 35	8,0 ... 8,3	250 ... 300
Камерна	Виконання камерної музики, для солістів-вокалістів, музичних передач малих форм	10 ... 15	6	150
Велика літературно-драматична	Створення та передача радіовистав великих форм	20 ... 30	6 ... 6,4	150 ... 200
Середня літературно-драматична	Художнє читання, невелика по формі радіовистави	10 ... 15	5	100
Мовна	Інформаційні передачі, останні вісті	2 ... 4	3,2 ... 3,5	26 ... 30
Заглушена	Створення спеціальних ефектів при літературно-драматичних записах	6 ... 10	4	50
Апаратні	Перезапис фонограм, запис фрагментів програм для консервації	1 ... 2	3,5	33 ... 40
Кімната «еха»	Створення ефектів змінної реверберації, зміна «об’ємності», гулкості та тембрального забарвлення звучання	–	4	50
Кімната прослуховування	Проведення експертиз	–	3,5	30 ... 40

Велика телевізійна	Музичні, літературно-драматичні передачі та зйомка із великим числом сценічних площадок зі складним оформленням	250	10 ... 12,5	450 ... 600
Середня телевізійна	Музичні, літературно-драматичні передачі та зйомка із невеликим числом ігрових площадок із нескладним декораційним оформленням	120	8,6	300
Мала телевізійна	Музичні, літературно-драматичні передачі та зйомка із малим числом (одна-дві) ігрових площадок із нескладним декораційним обладнанням; суспільно-політичні, науково-пізнавальні, літературні передачі; демонстрація експонатів, моделей і т.п.	30	6,5	150
Дикторська програмна	Показ дикторів або виступаючих (середній та крупний плани)	2 ... 4	4,2 ... 4.5	60 ... 80
Дикторська кабіна телекоментатора	Інформаційні передачі (без показу диктора)	1 ... 2	2,6 ... 2.8	12 ... 15

6. Сучасні телерадіоінформаційні комплекси

Сучасний цифровий радіокомплекс являє собою багатокористувацьку спеціалізовану обчислювальну мережу, що об’єднує (і розділяє) ресурси сервера, робочих станцій і периферійного обладнання. Серцем мережі є сервер (для телемовлення - відеосервер, для радіомовлення - аудіосервер), зв’язаний з потужною базою даних (відповідно - відео та аудіо)-автоматизованим архівом, рис. 3.15.

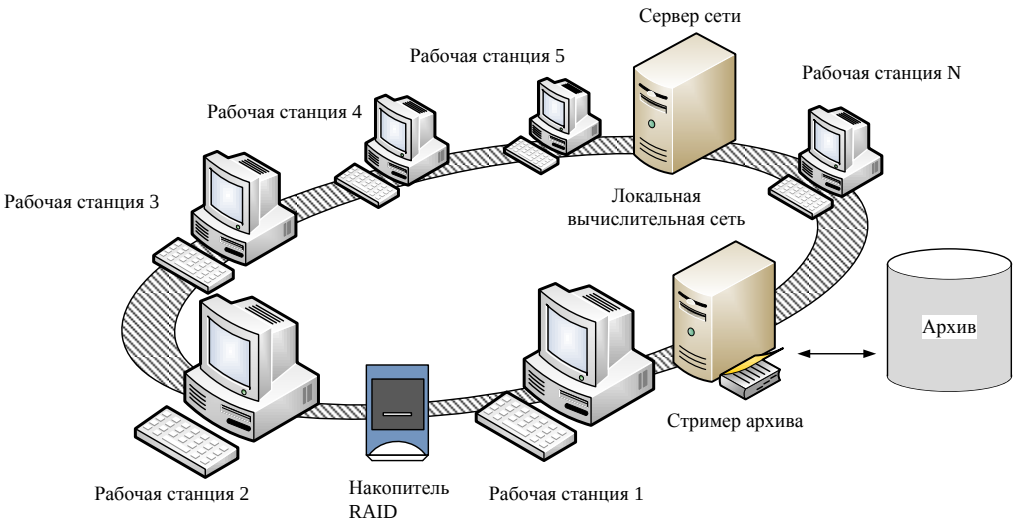


Рис.3.15. Локальна обчислювальна мережа телерадіокомплекса

Викладене тут відноситься до відео-і звукових програм, які реалізуються з використанням механізму аудіо-і звукозапису. Робочі станції, пов'язані з сервером по мережі, дозволяють обмінюватись відео-і звуком і об'єднувати (або розділяти) ресурси відповідних автоматизованих робочих місць (АРМ) працівників телебачення та/або радіомовлення. АРМ крім робочої станції забезпечені периферійним обладнанням, склад якого залежить від виду виконуваних операцій.

Сучасний комплекс радіомовлення крім основної радіомовної служби містить Інтернет-службу і службу мовлення даних, рис.3.16 (збільшено).

Комплекс складається з технологічних ділянок, укомплектованих АРМ працівників радіо.

До основних технологічних ділянок відносяться наступні:

– ділянка планування передач - для адміністрування, планування, збору і обробки даних, текстової підготовки передач;

– ділянка мовного записурізного роду мовних передач (інформаційних, художніх, тематичних);

– ділянка музичного запису - для запису музичних передач різних форм і відомості багатоканальних фонограм;

– позастудійні ділянки (пересувні звукові станції, віддалені кореспондентські пункти та трансляційні пункти) - для запису передач та їх частин у позастудійних умовах і їхньої первинної обробки;

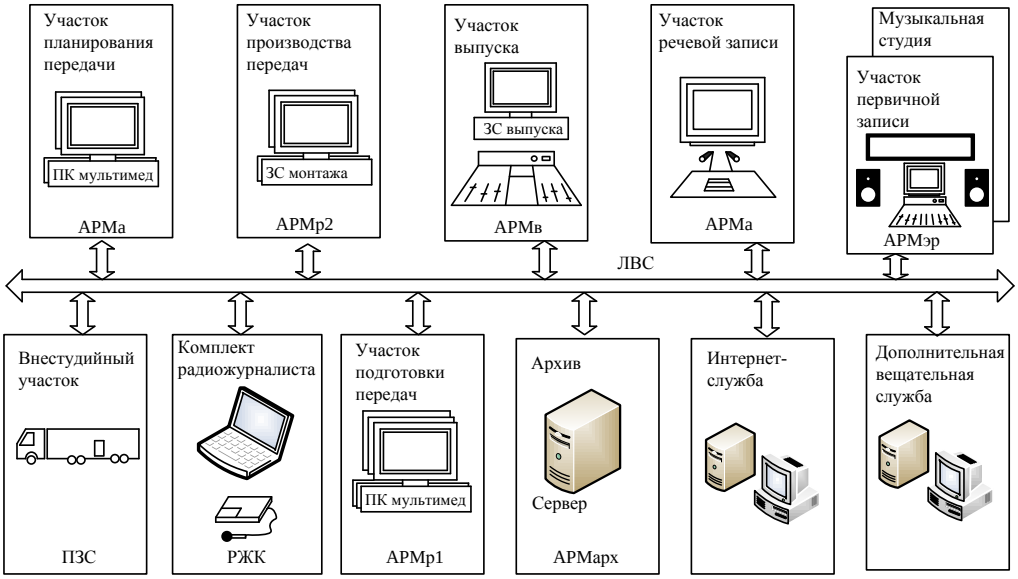


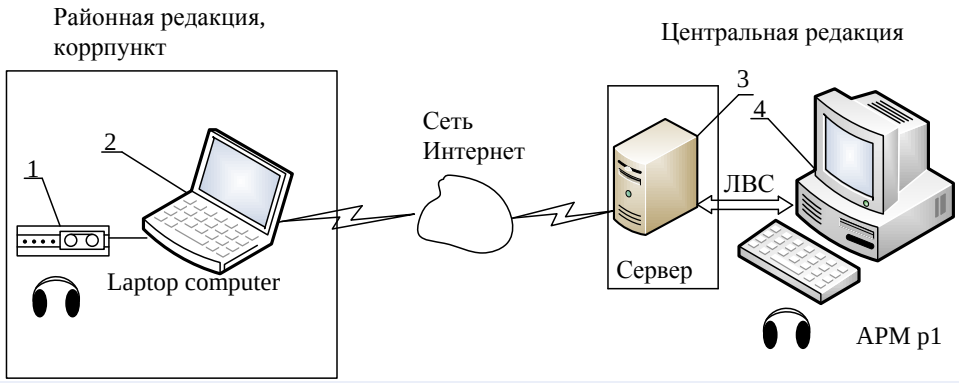
Рис.3.16. Склад радіомовного технологічного комплексу

– репортерські комплекти радіожурналістів (спрощені та монтажні) - для взяття інтерв'ю та проведення оперативних репортажів з місця подій;
– дільницю підготовки передач - для збору та обробки аудіоданих і підготовки фрагментів і частин передач;
– ділянка виробництва передач - для формування закінченої передачі з окремих фрагментів і частин, а також для формування розкладу (списку ефірнихрішень);
– автоматизований архів - для запису готових передач, для зберігання архівних копій, а також для відтворення збережених передач в ручному і автоматичному режимах;
– ділянка випуску передач - для ведення передач і управління їх випуском.

На рис.3.16 не представлені ділянки технічного контролю, управління зв'язком, записи контрольних фонограм тощо.

Інтернет-служба призначена для:
– підтримки виділеного каналу мережі Інтернет;
– обміну інформацією та звуком з віддаленими кореспондентами по мережі Інтернет;
– формування власної WEB-сторінки радіостанції;
– радіомовлення в мережі Інтернет.

Приклад організації Інтернет-зв'язку з віддаленими кореспондентами представлений на рис.3.17.



1 - Репортерський магнітофон, 2 - робоча станція репортера регіональної редакції, 3 - сервер центральної редакції, звукова станція центральній редакції

Рис.3.17. Передача аудіоданих по мережі Інтернет

Додаткова мовна служба - це радіомовлення додаткових даних (крім аудіо) у складі основного радіомовного сигналу на частоті радіостанції для надання додаткових послуг радіослухачам. Ця інформація може бути пов'язана (наприклад, найменування мовлення станції, розклад мовних програм, альтернативні частоти даної мовної програми тощо) або не пов'язана з вмістом програми мовлення (наприклад, пейджингові повідомлення для слухачів-автомобілістів щодо обстановки на автотрасі, попередження про надзвичайні ситуації і т.д.).

Широке поширення мовних послуг на супутню додаткову інформацію почалося після прийняття низки міжнародних стандартів на такі послуги і системи.

Після низки модифікацій в Європі з 1997 діє стандарт ETSI 300751 на протоколи системи RDS. Він орієнтований на системи радіомовлення в діапазоні метрових хвиль (87,5 ... 108 МГц).

АРМ представляють собою комплект обладнання, технологічних меблів і, при необхідності, спеціально виділене приміщення або вигородка з акустичною обробкою поверхонь. *До складу АРМ входить* робоча звукова станція, включена в локальну обчислювальну мережу (ЛОМ) та набір периферійного обладнання (визначається характером виконуваних робіт).

АРМ адміністратора (АРМа). Це - персональний комп'ютер, що є робочою станцією ЛОМ.

Призначений для:

– роботи з текстовими, графічними файлами і прослуховування звукових файлів;

– управління по мережі сервером даних (запис, пошук, читання), сервером аудіоданих (пошук, тільки читання);

– проведення економічних, бухгалтерських розрахунків, збору та обробки інформації (у тому числі через мережу Інтернет), підготовки текстових документів тощо.

АРМскладаєтьсяз*мережевоїробочоїстанції* (мультимедійнийПК, дісплей, клавіатура, миша, звуковіколонки, головнітелефони)

і*периферійногообладнання* (принтер, сканер, розмножувальнийапарат, телефоннийабонентськийапаратнакомп'ютерномустолі).

АРМ редактора (АРМр). *Призначений для*

–роботи з текстовими, графічними і звуковими файлами;

– управління по мережі сервером даних (редагування, запис, пошук, читання), сервером аудіоданих (запис, пошук, читання), автоматизованим архівом (пошук, читання);

– управління віддаленими робочими станціями інших АРМ (за наявності пріоритетів).

Використовується при автоматизації таких процесів створення радіомовних програм:

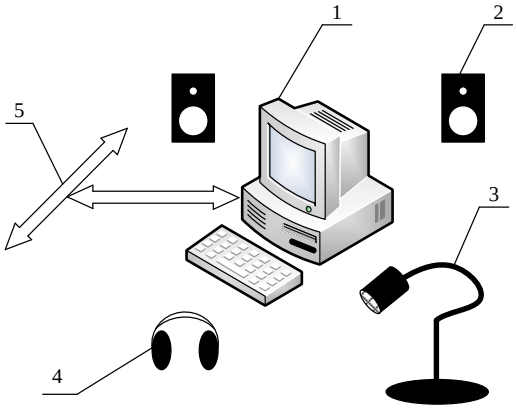
– прослуховування передач і фрагментів, розміщених на дисковому просторі станції, на аудіосервері або автоматизованому архіві, або отриманих від додаткових джерел мовних сигналів;

– складання і ведення розкладів мовних передач;

– редагування мовних програм, передач, сюжетів і фрагментів шляхом видалення, вставки, перестановки з використанням найпростішої обробки сигналів (складання і ведення списків монтажних рішень);

– введення і редагування метаданих, які супроводжують файли аудіоданних.

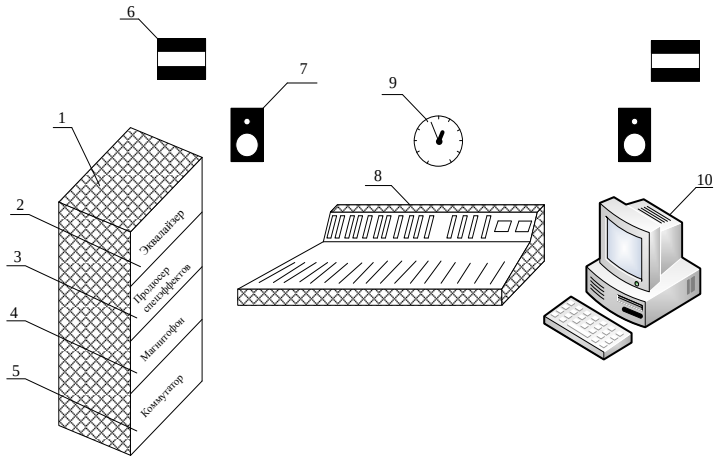
Подібними АРМ можуть комплектуватися АРМ адміністратора мережі (АРМас); оператора монтажу (АРММм:), звукорежисера (АРМзрж), фонотекаря (архівіста - АРМарх), диктора (АРМд), що випускає (АРМв). На рис.3.18 представлений варіант АРМ редактора радіомовлення.



1-робоча станція редактора. 2-активні гучномовці,3-«губний» мікрофон, 4-головні телефонии, 5-ЛВС

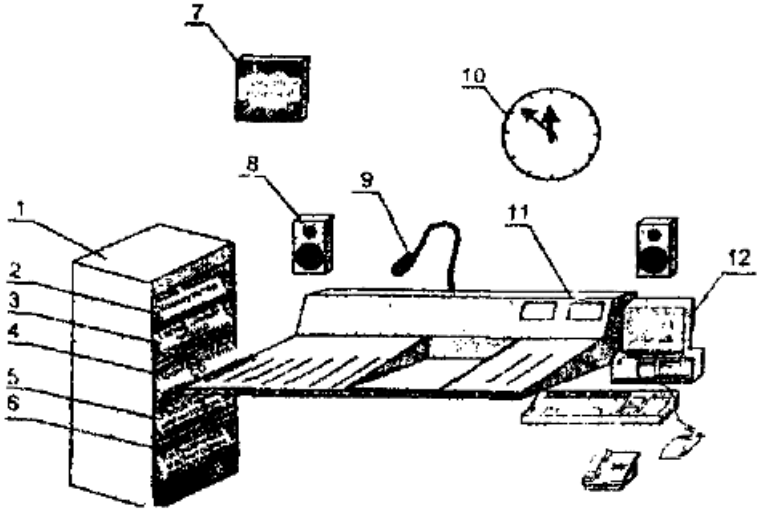
Рис.3.18. АРМ редактора радіомовлення

АРМ звукорежисера представлена на рис.3.19.



1-технологічні меблі, 2- еквалайзер, 3 – процесор обробки звукових сигналів, 4- магнітофон, 5- комутаційна панель, 6- світловий сигналізатор, 7- звуковий монітор, 8 – пульт звукорежисера, 9- годинник, 10 – багатоканальна звукова станція

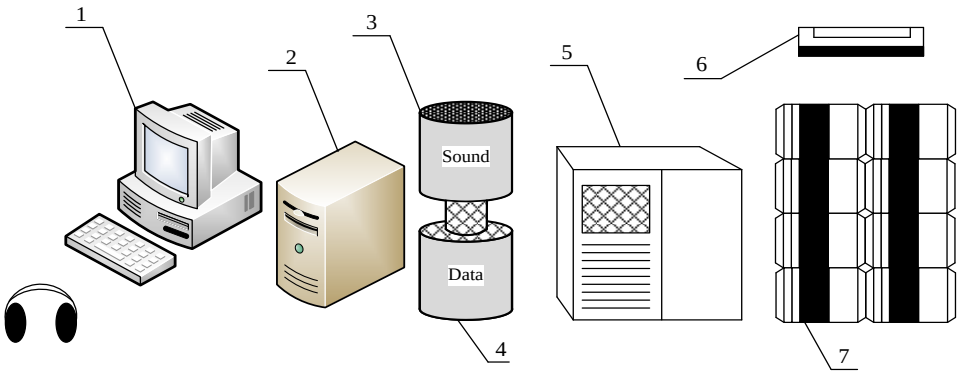
Рис.3.19. АРМ звукорежисера



1-технологічні меблі,2- комутатор сигналів, 3 – телефонний гібрид, 4- програвач CD, 5- касетний магнітофон, 6-катушечний магнітофон, 7- світловий сигналізатор, 8 – звуковий монітор, 9- мікрофон ведучого, 10-годинник, 11 – пульт випускаючого, 12 – звукова робоча станція випускаючого

Рис.3.20. АРМ випускаючого

Склад АРМ фонотекаря представлено на рис.3.21.



1- робоча станція, 2 - сервер, 3 - база оперативних аудіоданих,4- база даних, 5 - база аудіоданих середньострокового зберігання (багато-зарядний автомат відтворення CD, CD ROM, CD-RB та DVD). 6 - пристрій запису архівної копії, 7 - стелаж архівних копій середньострокового та довгострокового зберігання

Рис.3.21. АРМ фонотекаря

Технологічні процеси підготовки та виробництва передач з використанням перспективних технологій відображено в табл. 3.2 та 3.3. З урахуванням викладеного вище коментар до таблиць не потрібно

Таблиця 3.2. Технологічні процеси підготовки та виробництва мовних передач

№ пп	Технологічний процес	Зміст процесу	Результат процесу	Учасники процесу	Технологічна ділянка	Технологічні засоби
1. Підготовча стадія						
1.1	Планування	Збір та обробка інформації, складання планів сітки мовлення, планів передач	Проект сіткимовлення, проект розкладу передач	Редактор дирекції прорив. редакції	Дирекція програм, редакція	АРМр
1.2	Організаційні заходи	Збір та обробка інформації, складання та затвердження організаційних документів	Відрядні документи, договори, трудові угоди з авторами, виконавцями, інформаційними агентствами, орендодавцями операторами зв'язку іншими третіми особами	Редактор, музичний редактор, звукорежисер	Дирекція програм, редакція	Робоча (комп'ютерна станція
1 .3	Текстова підготовка передач	Підготовка сценаріїв, тексту передач, партитур	Сценарії, тексти партитури	Автор, редактор, музичний редактор	Редакція	Робоча станція
1.4	Підготовка звукових архівних матеріалів і матеріалів сторонніх виробників	Замовлення, придбання, доставка, прослуховування і Перезапис звукових матеріалів	Фонограми матеріалів, записані у форматах, прийнятих в даній мовній компанії	Редактор, оператор	Апаратна або ділянка перезапису, кімната або ділянка прослуховування, або редакція	АРМр
1.5	Репетиційна підготовка	Репетиції		Виконавці, режисери	Звукова студія, апаратна	
1.6	Підготовка каналів зв'язку	Резервування і «прогін» каналів зв'язку	Діючі канали зв'язку (звуку, технологічного зв'язку, даних)	Оператори	Центральна апаратна, апаратно-програмний блок, апаратно-студійний блок	Робоча станція, вимірювальне обладнання
2. Виробнича стадія						
2.1. Студійний звукозапис						
2.1.1	З мовної студії	Первинний запис фрагментів, сюжетів і передач із студії	Фонограма фрагментів, сюжетів і передач із студії	Виконавці ведучий, звукорежисер, оператор	Мовна студія або апаратна	Мікрофони, ЛРМзржр. в т.ч. засоби запису
2.1.2	З музичної студії	Багатоканальний запис	Багатоканальна та / або стереофонічна	Виконавці,	Музична студія або	Мікрофони,

		фрагментів, сюжетів і передач	фонограма	звукорежисер, оператор	апаратна	АРМзржр, в т.ч. кошти багатоканального запису
2.1.3	З літературно-драматичної студії	Багатоканальний або стереофонічний запис сюжетів і передач	Багатоканальна або стереофонічна фонограма	Виконавці, звукорежисер, оператор	Літературно-драматична студія або апаратна	Мікрофони, АРМзржр, в т.ч. кошти багатоканального запису
2.1.4	Під фонограму	Первинний запис окремих партій під фонограму	Багатоканальний або стереофонічна фонограма	Виконавці, звукорежисер, оператор	Музична студія або апарат паю	Мікрофони, головні телефони, АРМзржр, засоби відтворення багатоканального запису
2.2 Нестудійній запис						
2.2.1	Засобами пересувних звукових станцій	Первинний запис фрагментів, сюжетів і передач з театрів, палаців, зі стадіонів, відкритих майданчиків та сцен	Фонограма фрагментів, сюжетів і частин передач, записаних на позастудійних сценічних майданчиках	Учасники, виконавці, звукорежисер, оператори, асистенти операторів	Пересувна звукова станція (ПЗС)	Мікрофони, АРМзржр, ПЗС, засоби багатоканального запису
2.2.2	Репортерський запис	Первинний репортерський запис фрагментів та сюжетів на місці подій	Репортерські фонограми	Учасники, журналіст, звукооператор	Журналіст на виїзді	Комплект журналіста
2.3. Виготовлення передач						
2.3.1	Зведення фонограм	Зведення багатоканальних фонограм	Стереофонічна фонограма сюжету, передачі	Звукорежисер, оператор, оператор-монтажер	Апаратна зведення фонограм або студійна апаратна	АРМзржр, АРМред, в т.ч. кошти багатоканального запису
2.3.2	Монтаж фрагментів та сюжетів	Монтаж фрагментів та сюжетів з лінійною або нелінійною обробкою сигналів звуку і введенням	Сюжети передач, записані в сервер або на знімному носії запису звуку	Редактор, звукорежисер, оператор	Апаратна або ділянка монтажу	АРМр

		спецефектів або без них				
2.3.3	Монтаж передач	Лінійний або нелінійний монтаж фрагментів та сюжетів	Змонтовані передачі, записані на сервер або на знімному носії запису	Редактор, звукорежисер, оператор	Апаратна або ділянка монтажу	АРМр
2.3.4	Кодування передач	Введення ідентифікаційних ознак передач	Система ідентифікаційних кодів, які супроводжують передачу (метадані)	Редактор	Ділянка кодування передач	АРМр
3. Формування розкладу і архівування						
3.1	Формування розкладу	Формування розкладу у формі випуску передач (play list)	Список (журнал) випуску передач (play list)	Редактор	Апаратна випуску, апаратно-програмний	АРМр
3.2	Формування архівної копії	Формування копії фонограми для архіву	Формування даних ідентифікації фонограм для архіву	Редактор	Архів, ділянка кодування передач або редакція	АРМр
3.3	Виготовлення архівної копії фонограми	Виготовлення копії фонограми на окремому носії запису для короткострокового або довгострокового зберігання	Архівна копія короткострокового або довгострокового зберігання	Оператор	Архів, ділянка виготовлення архівних копій фонограм	Обладнання перезапису на магнітнітну стрічку і опт ичні диски
3.4. Пряма передача						
3.4.1	З мовної студії	Здійснення прямої передачі з мовної студії	Сформований мовний сигнал на виході центральної апаратної або ділянки випуску мовних передач	У приватники, виконавці звукорежисер, оператор, що випускає	Мовна студія і апаратно-студійний блок, центральна апаратна	Мікрофони. АРМзржр. обладнання центральної апаратної
3.4.2	З музичної студії	Здійснення прямої передачі з музичної студії	Сформований мовний сигнал на виході центральної апарати тн ой чи ділянки виписка мовних передач	Учасники, виконавці звукорежисер,	м у з ика л ьная студія апаратно-студійний блок, центральна апаратна	Мікрофони, АРМзржр. обладнання

				оператор, що випускає		центральної апаратної
3.4.3	З літературно-драматичної студії	Здійснення прямої передачі з літературно-драматичної студії	Сформований мовний сигнал на виході центральної апаратної або ділянки випуску мовних передач	Виконавці звукорежисер, оператор, що випускає	Літературно-драматична студія та апаратна центральна апаратна	Мікрофони, АРМзржр. обладнання центральної апаратної
3.4.4	Трансляція передач з місць подій засобами ПЗС	Здійснення випуску прямої трансляції передач з позастудійних об'єктів	Сформований мовний сигнал на виході центральної апаратної або ділянки випуску мовних передач	Учасники, виконавці звукорежисер, оператор, що випускає	ПЗС, центральна апаратна	Мікрофони, АРМзржр засоби зв`язку з радіодомом
3.4.5	Трансляція репортажів з місць подій	Здійснення випуску прямої трансляції репортажу з віддаленого місця подій	Сформований мовний сигнал на виході центральної апаратної або ділянки випуску мовних передач	Учасники, журналіст, оператор цін тральних апаратної, що випускає	Журналіст на виїзді	Комплект журналіста, комплект засобів зв'язку з радіодомом, АРМв

3.5	Передача в записі	Здійснення випуску записаних передач відповідно до розкладу	Сформований мовний сигнал на виході центральної апаратної або ділянки випуску мовних передач	Випусковий, оператори центральної апаратної і монтажної апаратної	Центральна апаратна або ділянка випуску мовних передач	АРМв
3.6	Ретрансляція	Здійснення випуску без зміни передач, отриманих по каналах зв'язку	Сформований мовний сигнал на виході центральної апаратної або ділянки випуску мовних передач	Оператор центральної апаратної	Центральна апаратна	Обладнання центральної апаратної
3.7	Запис контрольної фонограми	Здійснення контрольного запису випускаємих передач	Контрольна фонограма призначена дляконтролю змісту випущених передач	Оператор центральної апаратної або ділянки випуску передач	Центральна апаратна або ділянка випуску передач	Апарат запису контрольної фонограми
3.8	Зворотний контроль	Здійснення технічного контролю сигналів мовлення передач, що надходять від мовного радіопередавача	Результати об'єктивного і суб'єктивного контролю	Оператор центральної апаратної	Центральна апаратна або ділянка випуску передач	Радіоприймач зворотнього контролю, вимірювальне обладнання

Копіювання фрагментів, сюжетів і передач здійснюється па етапах 2, 1, 2.2, 2.2.2 та 2.2.3. 1

Таблиця3.3. Процеси первинного запису із музикальної студії

№ пп	Технологічний процес	Зміст процесу Результат процесу		Учасники процесу	Технологічна ділянка	Технологічні засоби
Студійний запис						
	З музичної студії	Первинна запис фрагментів, сюжетів і передач із студії	Оригінали фрагментів, творів та передач з музичної студії	Виконавці, звукорежисер, звукооператори	Музична студія і апаратно-студійний блок	Звукове обладнання музичної студії. ЛРМзрж
1.Трактова репетиція						
1.1	*Первинна обробка студії та обладнання*					
1.1.1		Розстановка мікрофонів		Мікрофонний оператор	Музична студія або апаратна музичної студії	Музична студія, АРМзрж
1.1.2		Підготовка технологічного обладнання		Звукооператори	Музична студія або апаратна музичної студії	Музична студія, АРМзрж
1.1.3		Пробний запис	Пробна фонограма	Виконавці, звукорежисер. З в	Музична студія або апаратна музичної студії	Музична студія, АРМзрж

				у кооператори		
1.1.4		Попереднє прослуховування	Вказівки щодо коректування мікрофонів, режимів роботи звукового обладнання	Звукорежисер	Апаратна музичної студії	Музи кал ьная студія, АРМзрж
1.2	Основна частина репетиції					
1.2.1		Коригування розстановки мікрофонів		Звукорежисер, звукооператор	Музична студія, апаратна музичної студії	Музична студія, АРМзрж
1.2.2		Корегування режимів роботи звукового устаткування		Звукорежисер, звукооператор	Музична студія, апаратна музично й студії	Музична студія, АРМзрж
1.2.3		Технічний прогін-репетиція	Фонограма технічного прогону	Звукорежисер, звукооператор	Музична студія, апаратна музичної студії	Музична студія, АРМзрж
1.2.4		Прослуховування фонограми технічного прогону	Рішення про додаткову коригування або перехід до запису	Звукорежисер	Апаратна музичної студії	Музична студія, АРМзрж
1.3	Заключна частина репетиції					
1.3.1		Додаткова коректування розстановки мікрофонів і режимів роботи звукового обладнання		Звукорежисер, зв у кооператор	Апаратна музичної студії	Музична студія, АРМзрж

1.3.2		Відпрацювання технологічних прийомів	Готовність оператора, звукорежисера, звукооператора	Музична студія, апаратна музичної студії		Музична студія. АРМзрж
2	Запис передачі					
2.1	Основний етап запису передачі					
2.1.1		Здійснення запису передачі (твору)	Фонограма передачі (твору)	Звукорежисер, звукооператор	Музична студія, апаратна музичної студії	Музична студія, АРМзрж
2.1.2		Прослуховування збереженої передачі	Рішення про необхідність повторної запису окремих фрагментів і частин твір я (передачі)	Звукорежисер,	Апаратна музичної студії	Музична студія, АРМзрж
2.2	Додатковий етап запису передачі					
2.2.1		Повторна запис окремих фрагментів і частин (окремих партій) твори	Фонограми варіантів фрагментів і частин твору	Звукорежисер, звукооператор	Музична студія, апаратна музичної студії	Музична студія, АРМзрж
2.2.2		Прослуховування варіантів фрагментів і частин твору	Рішення про необхідність додаткової запису окремих фрагментів і частин	*Звукорежисер,*	Апаратна музичної студії	Музична студія, АРМзрж

			(партій) твору або про завершення записи			
2.3	Заключний етап запису передачі					
2.3.1		Прослуховування передачі і повторно записаних фрагментів і частин твору	Рішення про придатність записаних матеріалів для подальшої роботи або про повторний запису всієї передачі	Звукорежисер,	Апаратна музичної студії	Музична студія, АРМзрж
2.3.2		Кодування фонограм і передача їх наступного учасника процесу	Фонограми, записані в сервер, передані до архіву або на інший технологічний ділянку	Музичний редактор, оператори	Апаратна музичної студії	Музична студія, АРМзрж

Питання для самоконтролю

1. Яка структура радіодому? Обґрунтуйте необхідність його структурних одиниць.
2. Аргументуйте структуру апаратно-студійного комплексу.
3. Які функції кожної апаратної апаратно-студійного комплексу?
4. Які служби є в радіодомі (телецентрі) і яке призначення кожної з них?
5. Які засоби є в розпорядженні звукорежисера для виконання покладених на нього завдань?
6. Аргументуйте функціональне призначення обладнання апаратно-студійного блоку.
7. Дайте класифікацію студій. Аргументуйте відмінність їхнього обсягу.
8. Дайте характеристику реверберацийних процесів в студійних приміщеннях (концертних залах). Яка специфічна роль цих процесів?
9. Аргументуйте, як можна керувати реверберацийними процесами в студії і за межами студії.
10. Аргументуйте, що утворює і яким чином виконуються норми звукового фону у студійному приміщенні.
11. Сформулюйте ознаки якості звучання мовлення програми.
12. Аргументуйте, які параметри звукових сигналів піддаються обробці і для яких цілей.
13. Аргументуйте призначення і принцип функціонування пристроїв шумозаглушення. Де ці пристрої знаходяться?
14. Яке призначення і принцип функціонування вокалстресора? Де цей пристрій знаходяться?
15. Яке призначення і принцип функціонування фільтрів присутності і еквалайзера? Де ці пристрої знаходяться?
16. Яке призначення і принцип функціонування генератора вібратор і ексайтера? Де ці пристрої знаходяться?
17. Де знаходяться пристрій зміни висоти тону? Яке призначення і принцип функціонування пристрою?
18. Аргументуйте призначення, склад і принцип функціонування центральної апаратної радіодому.
19. Аргументуйте призначення, склад і принцип функціонування трансляційних пунктів і пересувних звукових станцій.
20. Дайте коментар до сучасних комплексів радіомовлення з безплівковими технологіями.

ДОДАТОК В. РОЗДАТНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ЛЕКЦІЇ №3

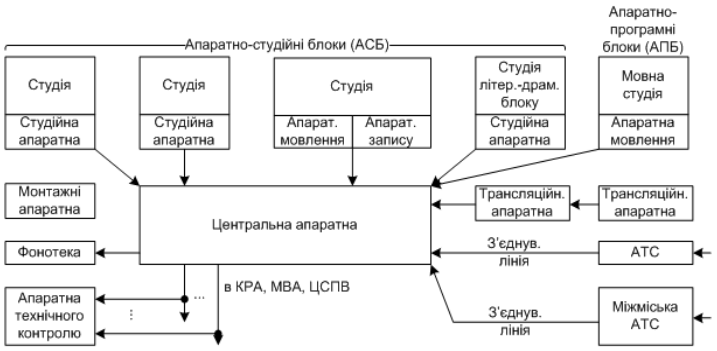


Рис. 4.4. Структура великого апаратно-студійного комплексу

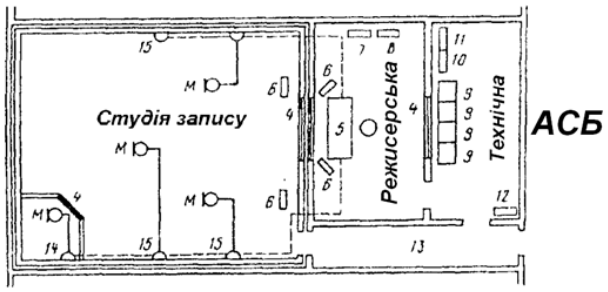


Рис. 4.5. Склад апаратно-студійного блоку

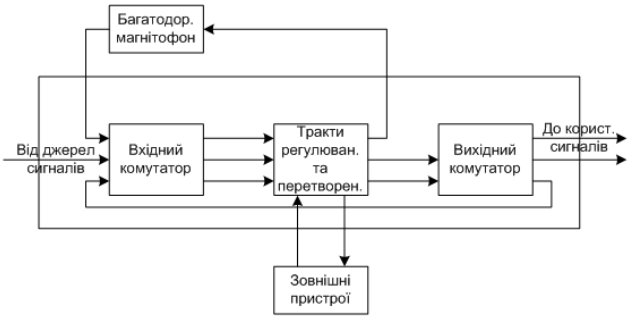


Рис. 4.6. Спрощена схема вільно формованої гнучкої структури сучасного пульта

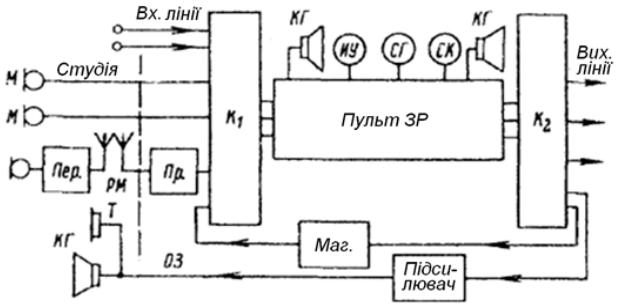


Рис. 4.7. Приклад побудови АСБ з аналоговим устаткуванням

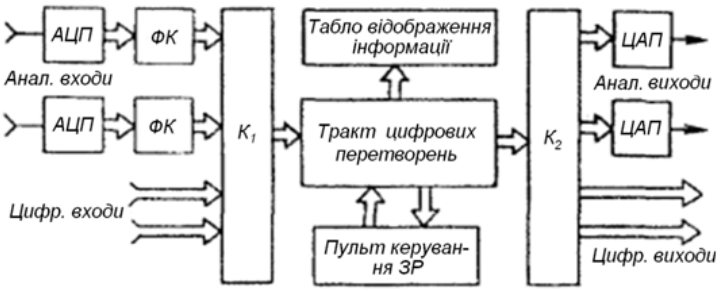


Рис. 4.8. Спрощена структура цифрового устаткування АСБ

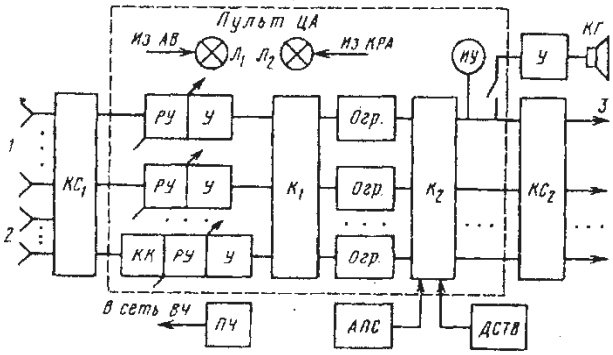


Рис. 4.18. Структурная схема центральной аппаратной

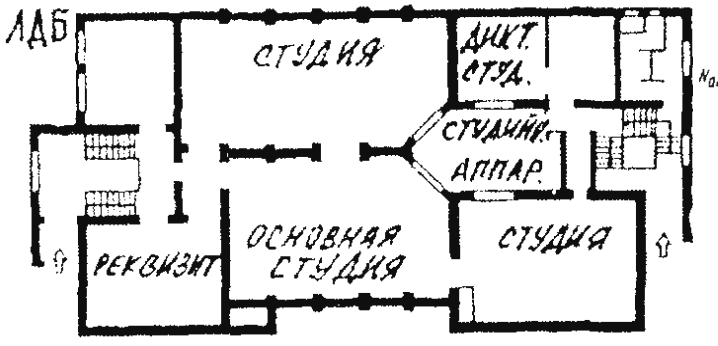


Рис. 4.3. Пример планировки литературно-драматического блока

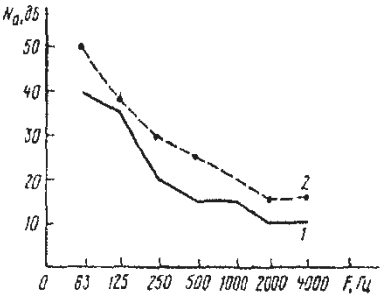
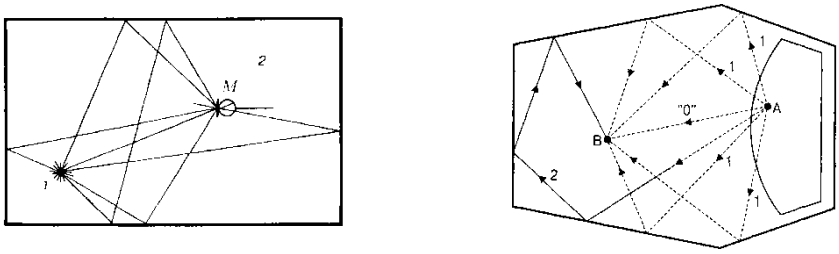


Рис. 4.14. Зависимость допустимого уровня звукового давления шума от частоты
1 – в радиовещательных студиях,
2 – в телевизионных студиях



а) б)

Рис.3.1. Распространение звуковой волны в помещении

Таблица 4.1. Основные типы студий звукового вещания

Наименование студии	Назначение	Число исполнителей	Высота, м	Площадь пола, м^2
Большая музыкальная	Музыкальные передачи крупных форм (классическая музыка в исполнении симфонических оркестров, хоровое пение и т.п.) с возможностью присутствия слушателей	До 250	13	1000
То же, но без слушателей	-	150	12	750
Средняя музыкальная	Симфоническая музыка (средних по числу исполнителей оркестров)	40 ... 65	8,5 ... 10	350 ... 450
	Запись эстрадной и джазовой музыки	35 ... 60	8,5 ... 10	350 ... 450
Малая музыкальная	Запись небольших оркестров и хоров	30 ... 35	8,0 ... 8,3	250 ... 300
Камерная	Исполнение камерной музыки, для солистов-вокалистов, музыкальных передач малых форм	10 ... 15	6	150
Большая литературно-драматическая	Создание и передача радиоспектаклей крупных форм	20 ... 30	6 ... 6,4	150 ... 200
Средняя литературно-драматическая	Художественное чтение, небольшие по форме радиоспектакли	10 ... 15	5	100
Речевая	Информационные передачи, последние известия	2 ... 4	3,2 ... 3,5	26 ... 30
Заглушенная	Создание специальных эффектов при литературно-драматических записях	6 ... 10	4	50
Аппаратные	Перезапись фонограмм, запись фрагментов программ для консервации	1 ... 2	3,5	33 ... 40
Комната «эха»	Создание эффектов переменной реверберации, изменение «объемности», гулкости и тембральной окраски звучания	-	4	50
Комната прослушивания	Проведение экспертиз	-	3,5	30 ... 40
Большая телевизионная	Музыкальные, литературно-драматические передачи и съемка с большим числом сценических площадок со сложным оформлением	250	10 ... 12,5	450 ... 600
Средняя телевизионная	Музыкальные, литературно-драматические передачи и съемка с небольшим числом игровых площадок, с несложным декорационным оформлением	120	8,6	300
Малая телевизионная	Музыкальные, драматические передачи малых форм с малым числом (одна-две) сценических площадок с несложным декорационным оборудованием; общественно-политические, научно-познавательные, литературные передачи; демонстрация экспонатов, моделей и т.п.	30	6,5	150
Дикторская программная	Показ дикторов или выступающих (средний и крупный планы)	2 ... 4	4,2 ... 4,5	60 ... 80
Дикторская кабина телекомментатора	Информационные передачи (без показа диктора)	1 ... 2	2,6 ... 2,8	12 ... 15

Рис.3.2. Процесс затухания звука в помещении

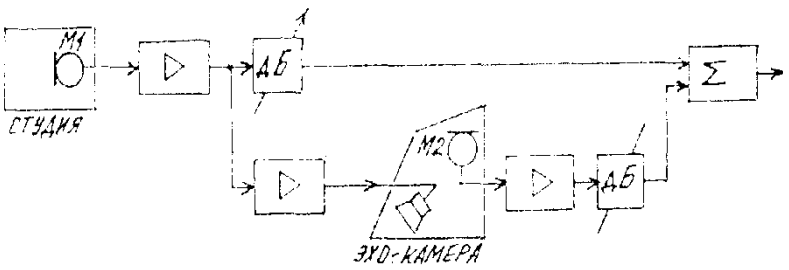


Рис. 4.12. Схема подключения эхо-камеры к тракту звукопередачи

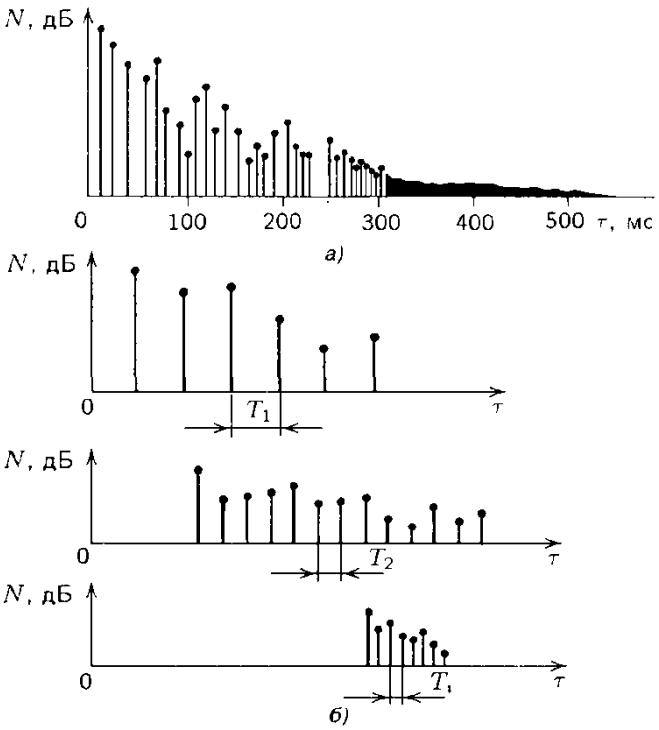


Рис.3.3. Временнаяструктурареверберационногопроцессавпомещении (а) исодержащиесявнемгруппыпериодическиследующихотзвуков(б)

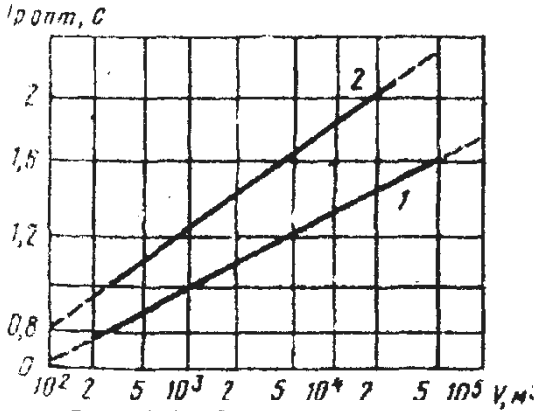


Рис. 4.10. Зависимость времени реверберации от объема студий:
1 – для речевых студий;
2 – для музыкальных студий

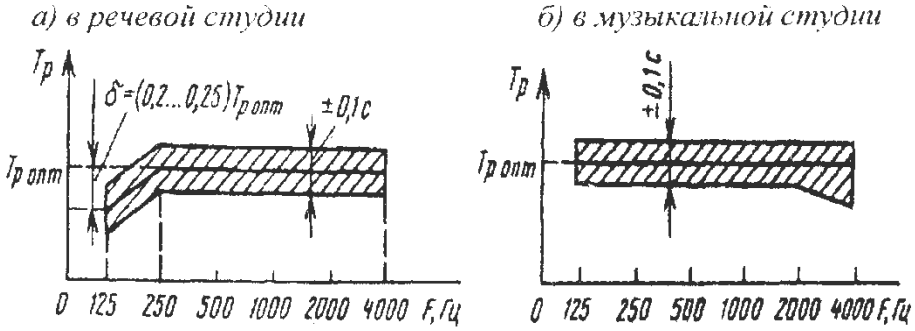


Рис. 4.11. Пределы изменения стандартной реверберации

Рис. 4.20. Локальна обчислювальна мережа телерадіокомплекса

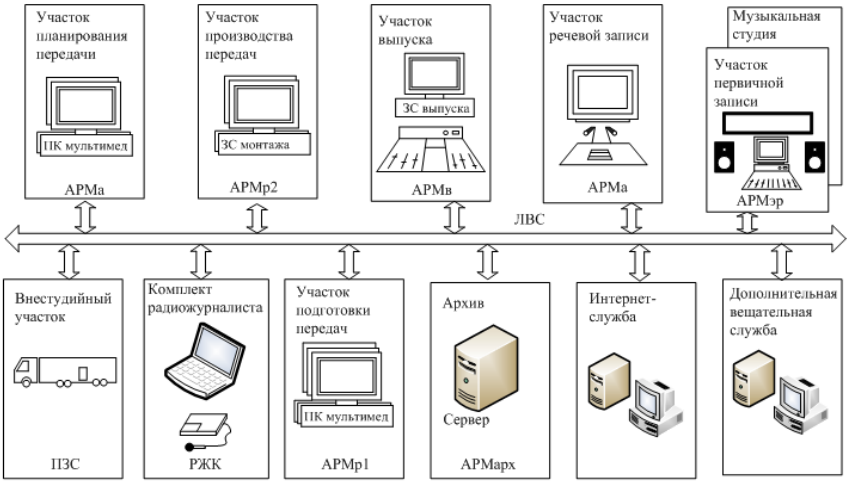
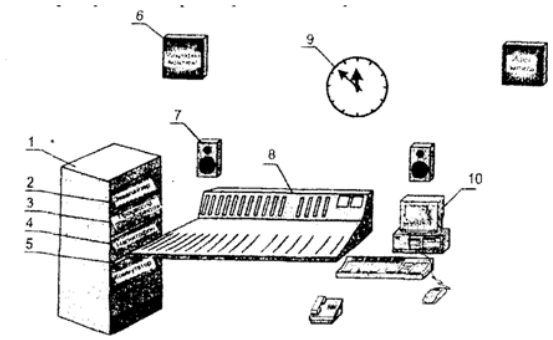
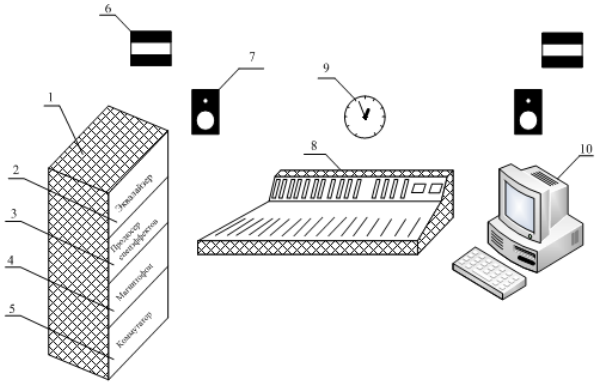


Рис. 4.21. Склад радіомовного технологічного комплексу



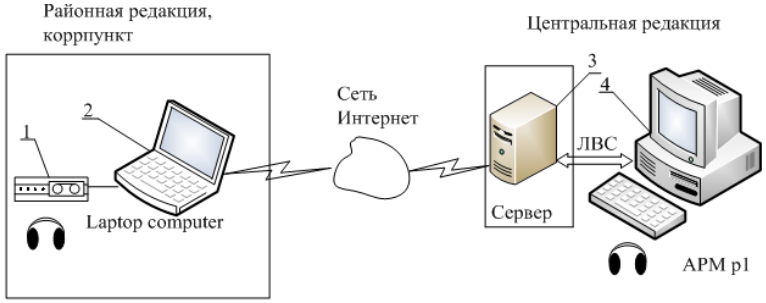
1-технологічні меблі, 2- еквалайзер, 3 – процесор обробки звукових сигналів, 4- магнітофон, 5- комутаційна панель, 6- світловий сигналізатор, 7- звуковий монітор, 8 – пульт звукорежисера, 9- годинник, 10 – багатоканальна звукова станція

Рис. 4.24. АРМ звукорежисера



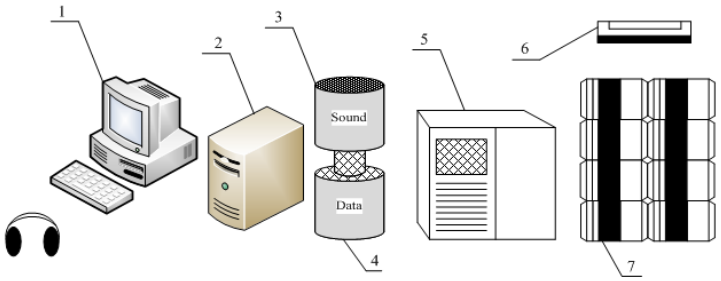
1-технологічні меблі,2- комутатор сигналів, 3 – телефонний гібрид, 4- програвач CD, 5- касетний магнітофон, 6-катушечний магнітофон, 7- світловий сигналізатор, 8 – звуковий монітор, 9- мікрофон

Рис. 4.25. АРМ випускаючого



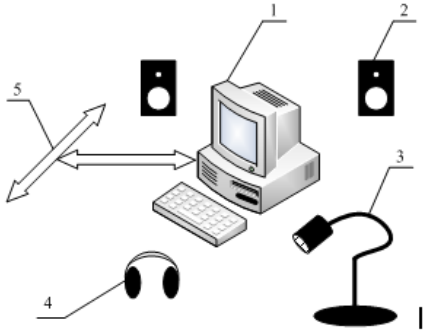
1 - Репортерський магнітофон, 2 - робоча станція репортера регіональної редакції, 3 - сервер центральної редакції, звукова станція центральній редакції

Рис. 4.22. Передача аудіоданих по мережі Інтернет



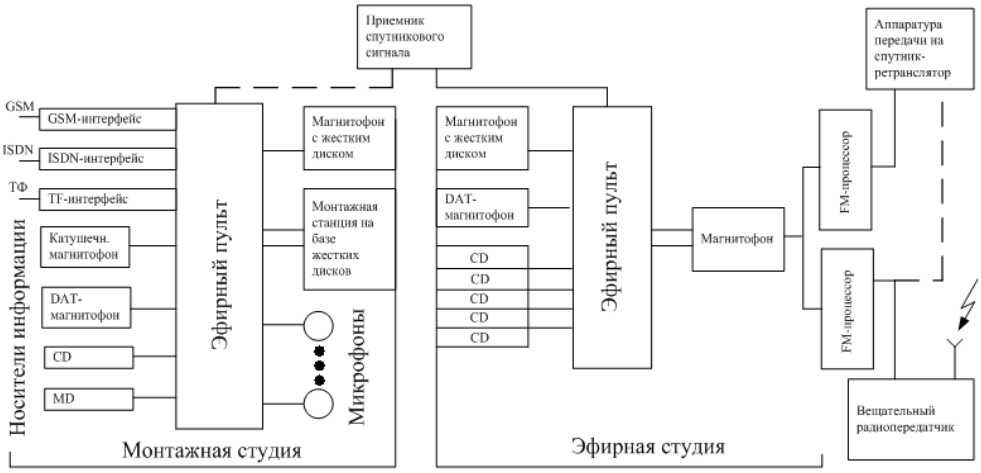
1- робоча станція, 2 - сервер, 3 - база оперативних аудіоданих,4- база даних, 5 - база аудіоданих середньострокового зберігання (багато-зарядний автомат відтворення CD, CD ROM, CD-RB та DVD). 6 - пристрій запису архівної копії, 7 - стелаж архівних копій середньострокового та довгострокового зберігання

Рис. 4.26. АРМ фонотекаря



1-робоча станція редактора. 2-активні гучномовці, 3-«губний» мікрофон, 4-головні телефонии, 5-ЛВС

Рис. 4.23. АРМ редактора радіомовлення



_ _ _ - (РЕЗЕРВИРОВАНИЕ)

Рис. 4.27. Структура комерційної радіостанції

‘

ЛЕКЦІЯ №4 ПОНЯТТЯ ПРО СИСТЕМИ ЗВУКОПЕРЕДАЧІ

ЛІТЕРАТУРА:

1. Брагин А.С. Технологиивещательных служб. Часть 1. Технологии звукового радиовещания. –К.: НТУУ «КПИ», 2006.
2. Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов./Под ред. Ю. А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком., Радио и связь, 2007. – 872 с.

РОЗДАТНИЙ МАТЕРІАЛ: див. ДОДАТОК А

1. Системи звукопередачі. Узагальнена структурна схема системи звукопередачі

Система звукопередачі *призначена* для якомога повнішої передачі сукупності відчуттів з первинного приміщення (студії, концертного залу) у вторинне - житлову кімнату радіослухача або телеглядача. Акустичні властивості цих приміщень сильно відрізняються один від одного. Це створює додаткові труднощі при передачі звукових програм і має суттєвий вплив на структуру системи звукопередачі.

Відомо, що слухачі, які сидять у перших рядах концертного залу, виразно сприймають розташування окремих інструментів по фронту і глибині. На місцях, більш віддалених від естради, чітко визначити місце знаходження окремих інструментів складніше - тут слухачі більш чітко відчувають протяжність оркестру.

Просторове враження - найважливіша особливість природного прослуховування. Не випадково на титульних сторінках партитур творів композиторів класичної музики зустрічаються вказівки для оригінальних складів інструментів і виконавців, як вони повинні бути розміщені на естраді та сцені. Це - не мода, а потреба використовувати найважливіший засіб впливу на слухача - роздільність звучання, яке може підкреслити конфліктність різних тем музичного твору, їх поєднання, зіставлення, протиставлення і т.п.

Система звукопередачі повинна забезпечити:

- якамога більш повну і точну передачу всього комплексу відчуттів, властивих природному слуханню, а саме просторового враження,природності тембрів інструментів і голосів, музичної рівноваги окремих елементів складного звучання, а також акустичних властивостей студії;
- створення у слухача «ефекту присутності», тобто ілюзії перенесення його в первинне приміщення з адекватними акустичними властивостями;
- широкі можливості для творчої фантазії звукорежисера і створення звукових ефектів, здійснення яких ускладнено в умовах природного прослуховування.

Тому ***звукопередача*** - це не пасивне перетворення звукового поля студії в аналогічне поле в приміщенні слухача. Це - ще й *процес активної творчої переробки звукорежисером* вихідної безлічі звукових сигналів, створення на приймальній стороні системи звукопередачі нового звукового поля, яке може

бути навіть не схожим на оригінал, але забезпечує повноцінне слухове сприйняття, властиве тому чи іншому способу звукопередачі.

Відзначимо, що *право на остаточний висновок, щодо якості звучання систем відтворення звуку належить тільки людині*, оскільки вона є споживачем цієї якості. На практиці такий висновок робить група спеціально підготовлених експертів (4 ... 6 осіб) , після прослуховування певного набору музичних і мовних програм, які відтворюються за допомогою системи, яку тестують.

У самому ***загальному вигляді*** система звукопередачі представлена на рис. 4.1. Вона складається з двох частин, одна з яких знаходиться на стороні передачі, а інша - на боці прийому.

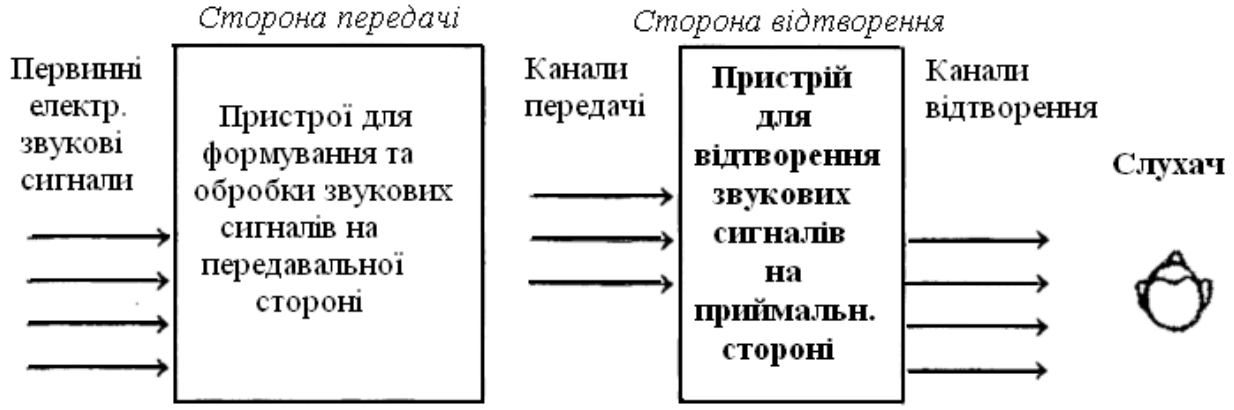


Рис.4.1. Звукова система радіомовлення і телебачення

Безліч *первинних звукових сигналів* від мікрофонів в студії та/або від виходів багатоканального магнітофона надходять на пристрій (сукупність пристроїв) для формування і обробки звукових сигналів. Цю сукупність утворюють:

- апаратура для запису і відтворення звуку;
- регулятори рівня (установчі і оперативні);
- комутаційні й змішувальні (мікшерні) пристрої;
- панорамно-кодуючі пристрої (регулятори напряму і протяжності стереопанорами);
- регулятори АЧХ, еквалайзери;
- реверберatори та інші.

Більша частина цих пристроїв входить до складу пульта звукорежисера.

Кожен первинний звуковий сигнал після формування надходить у тракти первинного та вторинного розподілу програм. Сформований звуковий сигнал передається на прийомну сторону (до слухача) по одному або кількома каналами передачі і надходить у пристрій для якісного відтворення звукових сигналів на приймальній стороні системи звукопередачі.

З виходу згаданого пристрою прийнятий звуковий сигнал по одному або декількох *каналах звуковідтворення* подається на *гучномовці системи відтворення*. Після перетворення (в гучномовцях) електричних звукових сигналів в акустичні останні надходять слухачеві.

За ***кількістю каналів передачі*** системи звукопередачі класифікуються на одно-, дво-і багатоканальні системи.

Число первинних електричних звукових сигналів може бути більшою числа каналів передачі. Число каналів відтворення може не збігатися з кількістю первинних електричних звукових сигналів.

До розгляду систем звукопередачі корисно дати відомості про оцінку якості звучання.

2. Оцінка якості звучання

Якість звучання - це сукупність відчуттів, яківі дрізняють один спосіб звукопередачі (і відтворення) від іншого.

Для того, щоб результати суб'єктивної експертизи стали об'єктивно достовірними і забезпечували стабільну повторюваність оцінок, потрібно стандартизація всіх її етапів і технічних засобів.

Така робота фахівцями частково виконана, а її результати введені в міжнародні стандарти (Рекомендації МСЕ-Р BS.1116 і 1387-1, а також EBURec. Tech. 2376-E і AES 20-1996). У стандартах обумовлені:

- умови прослуховування (розміри приміщення та його акустичні властивості, порядок відбору апаратури і її розміщення в приміщенні, час реверберації порядку 0,3 ... 0,4 с, відсутність виражених акустичних резонансів, низький рівень шумів, порядок підбору і розміщення слухачів, технічні характеристики тракту звуковідтворення);
- процедура експертизи (вибір програмного матеріалу, методика його оцінки, порядок прослуховування та інтерпретації отриманих результатів);
- підбір експертів (перевірка слухових порогів, досвіду прослуховування, методики тренування);
- форма оціночних таблиць і способи статистичної обробки результатів.

Оцінка якості звучання - трудомісткий і відповідальний процес. Часто оцінка якості звучання здійснюється за моделлю ***ESP*** (від англ.: Emotional response - емоційна реакція; Sensation - відчуття; Physicalcharacteristics - фізична характеристика). Відповідно до неї процес слухового сприйняття умовно поділяється на два етапи - аналіз і синтез, рис.4.2.

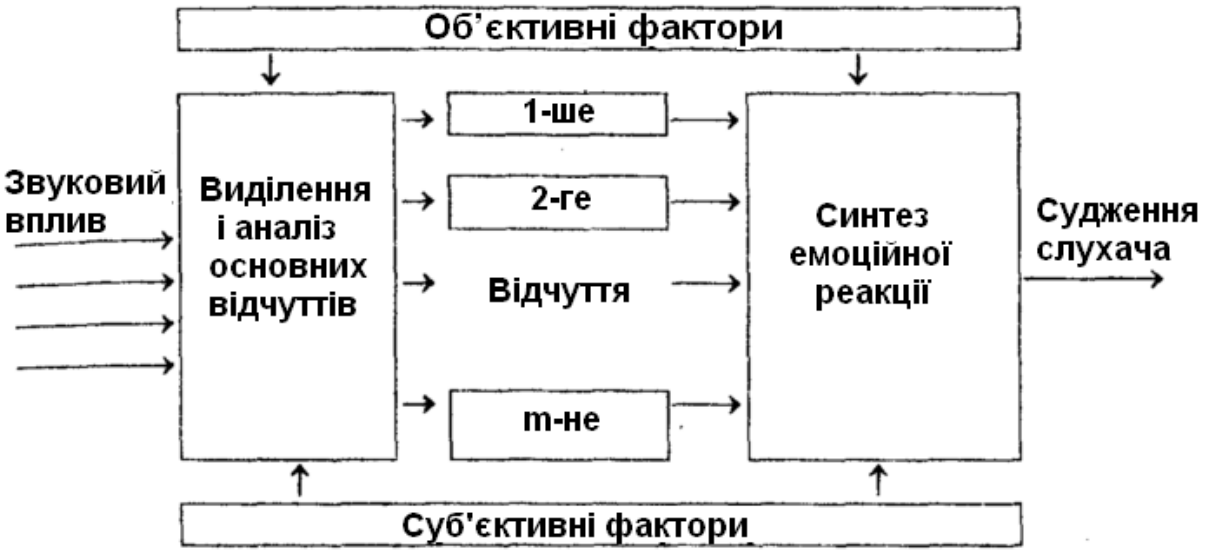


Рис. 4.2. Модель формування емоційної реакції слухача на звуковий вплив

Тут групи 1, 2, ..., m представляють безліч «простих» відчуттів, між якими існує кореляційний зв'язок. Ці групи відчуттів утворюють *основні статистично незалежні ознаки якості*, властиві звучанню даного типу.

Число основних статистично незалежних ознак якості зазвичай не перевищує чотирьох-п'яти. Цей обмежений набір основних ознак якості і визначає узагальнену оцінку. На етапі синтезу виділені основні відчуття об'єднуються в єдиний звуковий образ і формується реакція слухача на оригінальний звуковий вплив, сприйняття «живої» звукової картини змінюється в часі і просторі.

Кожному виду звучання (моно- , стерео- , квазістерео-, і т.д.) відповідає свій набір основних статистично незалежних признаків якості.

Вид звучання визначається структурою системи звукопередачі. *Окремі пристрої системи звукопередачі можуть вносити певні за величиною викривлення, які змінюють лише основні ознаки якості*, внаслідок чого змінюється оцінка якості звучання. З цієї причини *пристрої, які входять до складу системи звукопередачі, не повинні вносити спотворення, що лежать вище порогу їхньої слухової помітності* (якщо мова йде про потенційні можливості останньої).

Примітка. Ще на початку появи двоканальних стереофонічних систем був відзначений на перший погляд парадоксальний факт - людський слух явно віддавав перевагу стереофонічному звучанню в порівнянні з монофонічним (навіть при істотно гірших об'єктивних параметрах стереофонічного). Так, стереофонічна програма з смугою частот лише 100 ... 6400 Гц і коефіцієнтом гармонік до 20% здавалось, що звучить більш приємно в порівнянні з монофонічною програмою з смугою частот 30 ... 15000 Гц і коефіцієнтом гармонік не більше 3%.

Аналогічне явище спостерігалось при порівнянні двоканального стереозвучання з шестиканальним, формату 5.1. Задовільній об'єктивній якості каналів 5.1 віддавалася перевага їх двоканальним стереофонічним каналам, навіть з якістю «Hi-End»!. Однак,з

наведеного, не випливає висновок про необов'язковість технічних (тобто об'єктивних) характеристик високої якості при розробці багатоканальної апаратури.

Зазвичай якість звучання оцінюється за допомогою експертизи:

- а*бо за ознаками* (експерт вписує в анкету відчуття, що виникають у нього при сприйнятті зазначеного виду звучання, наприклад, в термінах, зміст яких потім уточнюється в індивідуальній розмові),
- а*бо за сприйняттям «в цілому»* за перевагою, не розділяючи його на окремі ознаки (експерт зазначає у анкеті, яке звучання з пред'явлених він вважає за краще).

Перевагою називається виражене у відсотках *число експерто-показань* за дану систему (при порівнянні з іншими) до загального їх числа.

Для кількісної оцінки якості звучання «в цілому» (або величин відчуттів) використовуються психофізичні шкали й особливі методи обробки результатів експертиз. Для опису своїх відчуттів при порівнянні моно- і стереофонічного звучань експерти використовують понад 50 термінів. З усього різноманіття відчуттів умовно виділено сім груп ознак якості стереофонічного звучання, табл. 4.1.Наведені групи ознак якості не є статистично незалежними.

Таблиця 4.1. Групи ознак якості звучання і частість, їх використання

Групи ознак якості (термін)	**Частість вживання терміну**	
	кваліфікованими групами	**звичайними слухачами**
1. Ширина звукової панорами	0,13	0,24
2. Об'ємність звучання	0,14	0,9
3. Прозорість, чіткість, роздільність Звучання різних інструментів або їх груп	0,2	0,09
4. Природність і багатство тембрів інструментів і голосів з їх нюансами	0,22	0,17
5. Передача басових звуків оркестру без зайвої гулкості	0,18	0,15
6. Помітність шумів і завад	0,12	0,04
7. Загальний термін, що не належить ні до одної зі згаданих груп	0,01	0,21

До них відносять:

‘

-F_1– просторове враження (відчуття положення кожного джерела звуку як по глибині, так і у напрямку на нього),
-F_2 – прозорість звучання (здатність слухача виділити окремі голоси, інструменти або їх групи на фоні звучання ансамблю),
-F_3 – природність і багатство тембрового забарвлення голосів і інструментів (визначається частотними та часовими властивостями сигналів, реверберацією),
-F_4 – чистоту звучання (визначається наявністю або відсутністю в складі звуків сторонніх шумів і перешкод) ,
-F_5 – сприйняття акустичної обстановки приміщення концертного залу і властивих йому особливостей звучання - гулкості, теплоти, світлості, дзвінкості і т.д.

Для узагальненої оцінки якості звучання Q в психофізики часто використовується модель вигляду:

$$Q = \sum_{i=1}^{m} W_i \cdot F_i \qquad (4.1)$$

де W_i- вагові коефіцієнти.

На результати експертиз впливають: звуковий матеріал, склад експертної групи, умови та методика проведення експертизи, шкали оцінки, коректність математичної обробки результатів експертних оцінок. Нагадаємо, що *кінцевим споживачем в абсолютній більшості є некваліфікований слухач,* у зв'язку з цим довго велися дискусії про користь від проведення експертизи тільки кваліфікованими слухачами (експертами). Протягом декількох років різними фірмами проведені дослідження на предмет, коректності (збігу думок) професійних експертів і звичайних масових слухачів, виявлено наступне:
- суб'єктивні оцінки якості звучання обох категорій в середньому збігаються (при більшому розкиді цифр у звичайних слухачів),
- в силу малості розкиду оцінок у кваліфікованих експертів, для проведення експертиз запрошується невелика їх кількість (за стандартом МЕК - 5 ... 6 осіб); у випадку використання некваліфікованих слухачів кількість останніх для проведення експертиз потрібно значно більша,
- між об'єктивними технічними характеристиками акустичної апаратури і суб'єктивними оцінками будь-яких експертів спостерігається чітка кореляція,

- ціна на звуковідтворювальну апаратуру, яку продають, далеко не завжди відображає її якість звучання (вона встановлюється в розрахунку саме на непідготовленого покупця, який підпадає під сильний вплив реклами, «престижності» фірми, дизайну тощо).

На різних етапах розвитку звукотехніки запропоновано багато різних систем звукопередачі.Нижче наведено найбільш розповсюджені в даний час системи звукопередачі з використанням каналів передачі електричних сигналів мовлення.

3. Звичайна монофонічна система

Системи звукопередачі не обов'язково використовують канали електричного зв'язку. У них можуть використовуватися засоби запису (грамплатівки, магнітні касети, компакт-диски, оптичні диски тощо), які «переміщують» звукову програму до слухача через торгову мережу і іншими способами.

Історична довідка. Перша монофонічна система звукопередачі здійснена 8.12.1877 р.: Томас Едісон вперше здійснив запис пісеньки «Mary Had a Little Lamb» на носій інформації (валик, покритий олов'яною фольгою). «Посилені» за допомогою рупора звукові коливання повітряного середовища впливали на гнучку мембрану, поєднану з голкою, яка видавлювала канавку в м'якій олов'яної фользі. Глибина канавки залежала від величини тиску звукової хвилі на мембрану, тому спосіб запису отримав назву глибинного. При відтворенні (у приміщенні слухача) така ж голка рухалася по канавці, і існуючі в ній заглиблення змушували коливатися мембрану, перетворюючи їх у звук. Під час запису і при відтворенні обертання валика здійснювалося вручну.

Численні спроби вдосконалення системи Едісоном не увінчалися успіхом, оскільки записи на валиках неможливо було тиражувати.

Винахідником іншого варіанту запису (на целулоїдну пластинку), що одержала назву грамофон, вважається Е. Берлінгер (1888 р.), хоча ідея належить Шарлю Кро (1877). Коливання голки, пов'язаної з такою ж мембраною, як і в фонографі Едісона, відбувалися не у вертикальному, а в горизонтальному напрямку. Отримана доріжка у вигляді зигзагоподібної спіралі, переносилася на метал, після чого можна було здійснювати тиражування на платівку. Доріжка на платівці допускала багаторазове відтворення за допомогою голки, мембрани і рупора без особливих ушкоджень носія.

З 1896 р. замість целулоїду почали використовувати більш міцний склад, стала розвиватись і поперечний запис. Модель грамофона мала пружинний привід (як в механічних годинах-будильниках). У масовий продаж вони надійшли в 1902 р.

Найбільш кардинальні зміни в конструкцію грамофона внесла французька фірма «Пате», створивши портативну модель з звукопроводом всередині спеціальної валізки, яка отримала назву патефон. Патефон проіснував аж до появи перших електрофонів, де посилення коливань від звукової голки, перетворених в електричну напругу, здійснювалось вже методами електроніки.

Паралельно з грамзаписом розвивався і магнітний запис звукових сигналів. Він був винайдений в 1808 р. В. Паульсеном. Носієм інформації виступав металевий дріт.

У 30-х роках минулого століття замість дроту почали використовувати паперові стрічки з нанесеним на її поверхню магнітним шаром. Потім паперова стрічка була замінена пластмасовою.

Технологія запису/відтворення стала швидко вдосконалюватись і вже в кінці 40-х років на споживчому ринку з'явились перші монофонічні магнітофони.

Звичайна ***одноканальна (монофонічна) система***звукопередачі містить у приміщенні відтворення (тобто в приміщенні слухача, який іменується *вторинним приміщенням*) один гучномовець. Така система не вимагає більше одного каналу передачі звукових електричних сигналів з *первинного приміщення*, рис.4.3.

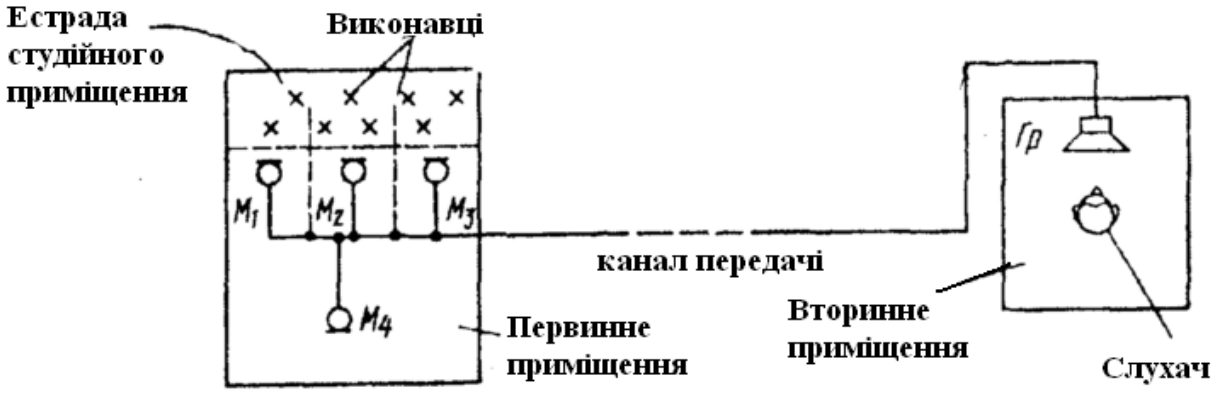


Рис. 4.3. Структура монофонічної системи звукопередачі

У студійному приміщенні (первинне приміщення) на естраді розташовані виконавці і мікрофони M_1, M_2, M_3, M_4. За допомогою студійного устаткування з безлічі сигналів звукорежисер формує, з його точки зору, повноцінний звуковий сигнал. За допомогою *єдиного канала* цей сигнал передається на прийомну сторону і сприймається одним гучномовцем (акустичною системою). Звучання від нього називається монофонічним («моно»- один, «фон» - звук): всі звуки виходять з єдиного джерела (гучномовця, телефону). Це відноситься як до сигналів прямих звуків, так і сигналами реверберацийного процесу.

Таким чином, ***панорама звучання студіїпри відтворенні виявляється стиснутою в одну точку.****У слухача не працюють механізми просторового демаскування (розпізнання) сигналів.* Тому прозорість звучання і сприйняття акустичної обстановки студії виявляються значно гірше, ніж при прослуховуванні в приміщенні з доброю акустикою.

У цій системі якість звучання виявляється найгіршою в порівнянні з іншими системами. Але система - найпростіша. Вона широко застосовується до теперішнього часу, особливо при передачі мовних інформаційних сигналів по так званих «репортажних каналах». Основним критерієм у цій системі є зміст інформації, що передається, а не краса звучання мови диктора (що впливає на емоційну сферу людини).

До *одноканальних систем звукопередачі* відносяться: ***система об'ємного звучання, псевдостереофонічна, квазістереофонічна.***

Повне позначення одноканальної системи звукопередачі N-1-1/0. Літера N означає число первинних електричних звукових сигналів. Перша цифра

відображає кількість каналів передачі, останні дві цифри - формат (число каналів) відтворення.

Умовне позначення монофонічного формату відтворення звуку «1/0», рис.4.4, а.

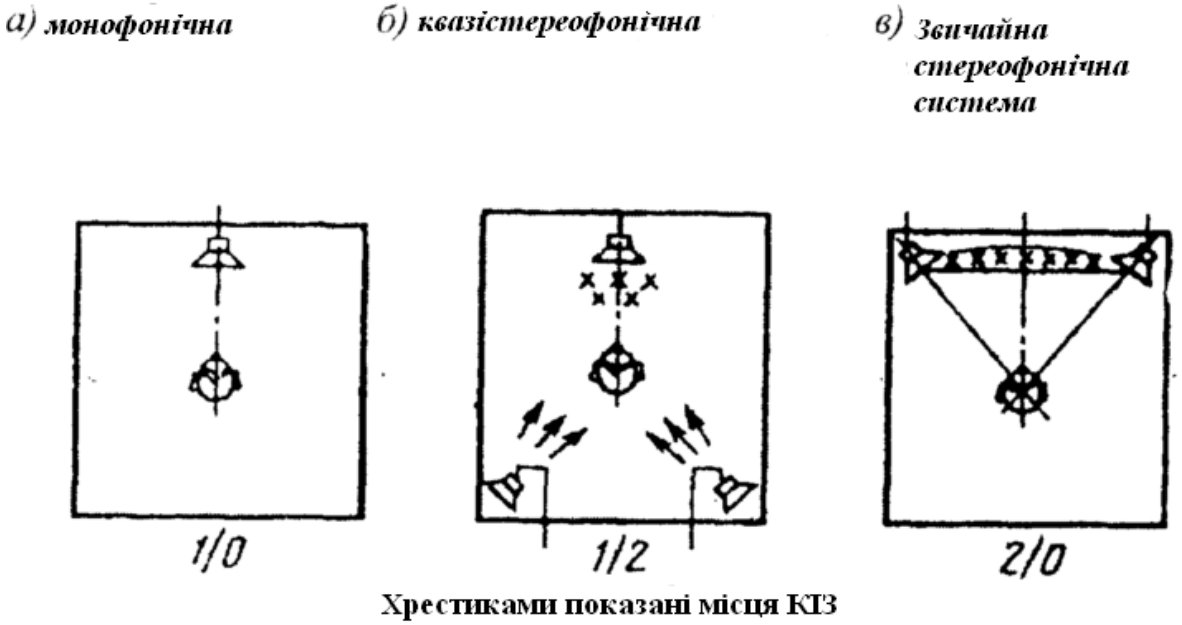


Рис. 4.4 Формати одноканальної і звичайної стереофонічної систем відтворення звукових сигналів

Тут перша цифра (1) означає число роздільних каналів для відтворення звукових сигналів, які містять як прямі, так і відбиті звуки в найкращому співвідношенні. Остання цифра (0) показує кількість каналів, що служать **тільки для відтворення реверберуючих сигналів**.

Квазі-стереофонічна система відтворення звукопередача(N-1-1-2) формату «1/2» показано на рис. 4.4,б.

4. Звичайна стереофонічна система. Уявні джерела звуку

Ідеальну звукопередачу можна здійснити, якщо у первинному акустичному полі встановити велику кількість мікрофонів, а кожен з мікрофонів з'єднати з таким же числом гучномовців в приміщенні слухача, рис.4.5.

Дослідження показали, що для отримання досить якісного звуковідтворення не обов'язково велика кількість каналів. Тому число каналів звукопередачі обмежується.

Можна ввести умовний «Коефіцієнт стереофонічності» і прийняти його рівним нулю при мофонічній звукопередачі і рівним одиниці при нескінченно великій кількості каналів. Виявилося, що при двоканальному відтворенні звуку цей коефіцієнт перебуває в межах 0,6 ...0,7. **Саме тому двоканальна стереофонія і отримала широке застосування в більшості країн світу**.

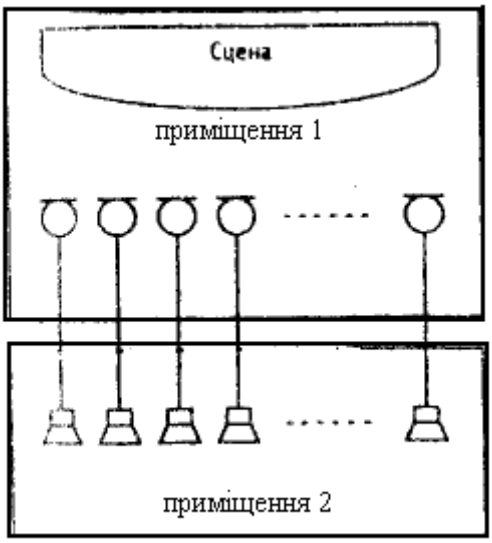


Рис.4.5 Ідеальна стереофонічна звукопередача

Історична довідка. Перший патент на спосіб стереофонічного запису був отриманий А. Блюмлейном (14.12.1931р.). Він визначав не тільки систему двоканального стереозвучання, але й безліч її елементів, що випередили розвиток систем звукозапису на десятки років вперед. Патент включав в себе 70 пунктів, які описували вимоги до таких елементів, як мікрофони та їх розташування під час запису, до параметрів диска для стерео запису, технологія стереомовлення як з амплітудною, так і частотною модуляцією радіопередавачів, описана матрична система сумування двох каналів в один, що забезпечує сумісність моно-і стерео запису і багато іншого. Патент передбачав два варіанти стерео запису -відтворення. Один представляв поєднання відомих на той час способів запису - ***поперечного*** для одного каналу (рис. 4.6, а) і ***глибинного*** для іншого (рис. 4.6,б).

Стереофонічна канавка при глибинно-поперечному запису з так званою орієнтацією 0/90 представлена на рис. 4.7, а.

Другий варіант стереозапису полягав у тому, що дві взаємно перпендикулярні складові коливання різця направлені під кутом 45° до поверхні диска. При цьому запис лівого каната (Л) виробляється на одній зі стінок канавки, а правої (П) - на іншій, рис.4.7,б.

Стереофонічні пластинки на 78 об/хв., що виготовлені із застосуванням поперечно-глибинного запису спробувала випустити на ринок фірма «Колумбія». Але через невисокий загальний рівень техніки запису/відтворення подібна стереофонія не прижилася і розвитку не отримала.

У 1936 р. інженер А. Келлер (лабораторія Белла) заново «винайшов» систему запису/відтворення стереопрограм на диску з орієнтацією 45/45 і навіть отримав патент.

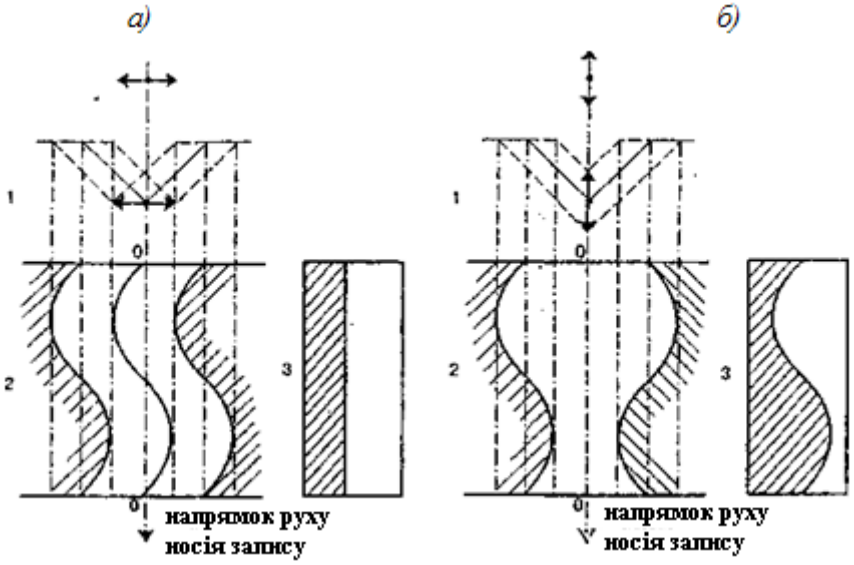


Рис.4.6. Утворення монофонічної канавки при поперечному (а) і глибинному (б) запису (1 - поперечний розріз канавки, 2 - вид канавки зверху, 3-розріз канавки перпендикулярно площині носія запису щодо осьової лінії 0-0)

Мало того, в 1957 р. корпорація Westrex «винайшла» стерео запис 45/45 втретє і продемонструвала на публіці. З цієї технології був випущений у продаж диск нового формату. Саме тому вважається, що стереофонічне звучання народилося разом з першою стереофонічною грамплатівкою, створеною А. Харді спільно з компанією DeccaRecords (1957 р.).

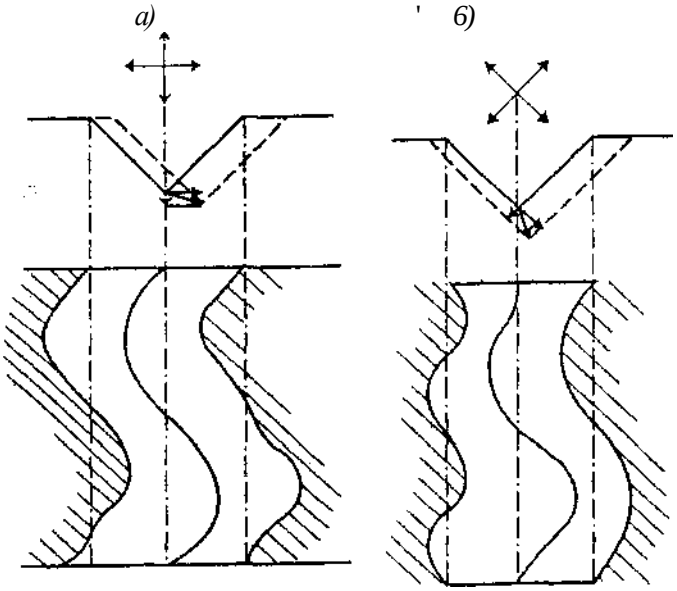


Рис. 4.7. Стереофонічна канавка при глибинно-поперечному запису з орієнтацією 0/90 (а) і при записі з орієнтацією 45/45 (б)

Система з поперечно-глибинним записом стереопрограм забезпечувала природність і роздільність джерел звуку, а також знання про їх розташування і переміщення. Вона стала споживчим форматом для масового використання в побутових умовах. Наявність двох каналів виявилося зручним стосовно запису на платівці, оскільки обидва канали можна записати в одній і тій же канавці.

‘

Природною реакцією на очевидні переваги звукової стереопанорами з'явилася думка про подальше збільшення числа каналів запису і відтворення з метою ще більш вражаючого звучання. При цьому згадали про експерименти з трьох канальним звучанням в лабораторії Белла ще в 30-і роки. Тоді її фахівці «ліквідували провал» звукової панорами між двома акустичними системами, доповнивши стереопару третім гучномовцем (розташованим в центрі між правою і лівою акустичними системами).

З появою в 1957 р. двоканального стерео запису з'ясувалося, що вона набагато більш приємна на слух в порівнянні з монофонічним. Вона створювала порівняно точне відображення звукового простору. І навіть недоліки самої фонограми та тракту звуковідтворення, особливо акустичних систем, які завжди були найбільш слабкою ланкою тракту, стали не настільки помітними.

У 60-і роки стали з'являтися інші роботи, які сприяли вдосконаленню техніки стерео запису.

Датою народження стереофонічного мовлення вважається 1 червня 1961. У 1963 році компанія Philips випустила першу компакт-касету, поява якої стала передумовою до створення в 1966 році восьми-доріжкового формату магнітного запису.

У 1969 році в лабораторії Р. Долбі успішно пройшла випробування система подавлення шумів магнітної стрічки (Dolby B).

Двоканальна стереофонічна система.Звичайна ***двоканальна стереофонічна система*** містить безліч первинних джерел звукових сигналів(які формуються на передавальній стороні), два канали передачі і два канали відтворення цих сигналів у приміщенні слухача (система N-2-2-2/0; формат відтворення «2/0»).

Вихідна множина первинних звукових сигналів від джерел звуку (див. рис. 4.1) перетвориться в лівий (Л) і правий (П) сигнали стереопари за правилом:

$$Л(\tau) = \sum_{i=1}^{N} a_{1i}(t) \cdot x_i(t - \Delta\tau_{1i});$$

$$П(\tau) = \sum_{i=1}^{N} a_{2i}(t) \cdot x_i(t - \Delta\tau_{2i});$$

де , a_{2i}, і $\Delta\tau_{1i}$, $\Delta\tau_{2i}$ - пари коефіцієнтів кодування і часові зрушення для і-го первинного сигналу $x_i(t)$ (при відтворенні формуючого і-те джерело звуку стереопари). Значення цих параметрів однозначно визначають місце розташування і-го *звукового образу* на лінії бази гучномовців $Гр_1$ і $Гр_2$ системи відтворення, рис.4.8.

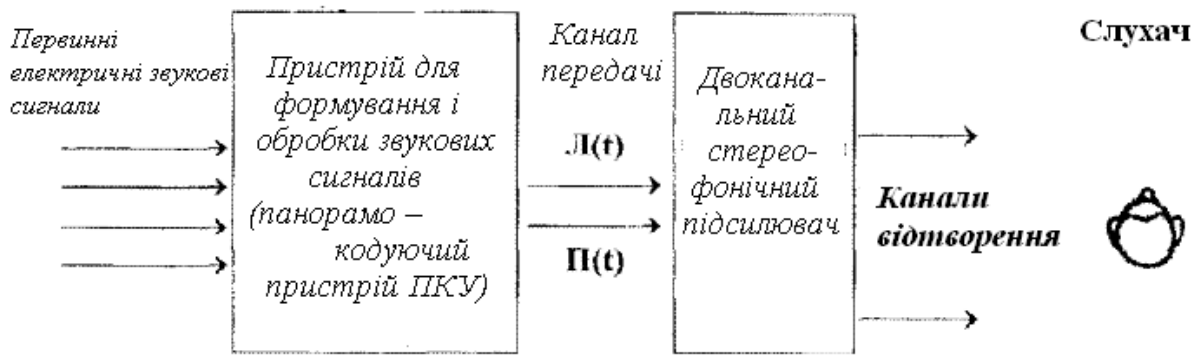


Рис.4.8. Структура звичайної двоканальної стереофонічної системи звукопередачі

Синтез (формування) сигналів стереопари ІІ(t) і ЛІ(t) на передавальній стороні виконується за допомогою ***панорамо - кодуючого пристрою*** (ПКУ) в пульті звукорежисера або/і за допомогою мікрофонних систем типу АВ, XY і MS в студії запису. Мікрофонні системи в кожному із згаданих типів характеризуються геометрією розміщення мікрофонів у студії.

Сигнали ІІ(t) і ЛІ(t) *по двох роздільним каналах* передачі надходять на відповідні входи тракту відтворення. До його складу входять двоканальний стереопідсилювач і система відтворення, що містить два гучномовці (акустичних систем). Гучномовці $Гр_1$ і $Гр_2$ розташовуються на деякий відстані один від одного перед слухачем (формат системи «2/0»).

Ніякі додаткові перетворення над сигналами стереопари в приміщенні відтворення можуть не виконуватися (за винятком регулювання гучності, тембрів нижніх і верхніх звукових частот і стереобалансу - у разі розміщення гучномовців не в єдиній конструкції, див. нижче рис. 4.9,б).

Лівий гучномовець $Гр_1$ випромінює сигнал **Л(t)**, а правий $Гр_2$-сигнал **П(t)**. Декодування сигналів **Л(t)**і **П(t)** здійснюється безпосередньо в слуховому аналізаторі людини.

Рознесення гучномовців конструктивно може бути різним, рис.4.9.

У сполученій системі (рис.4.9, а) гучномовці одинакові. У комбінованій системі (рис. 4.9,б) низькочастотні ланки лівого і правого гучномовців знаходяться в єдиному корпусі (наприклад, телевізора), а середньо-і високочастотні ланки виконані у вигляді виносних, порівняно малогабаритних гучномовців. На малюнках наведено рекомендовані значення граничних частот гучномовців.

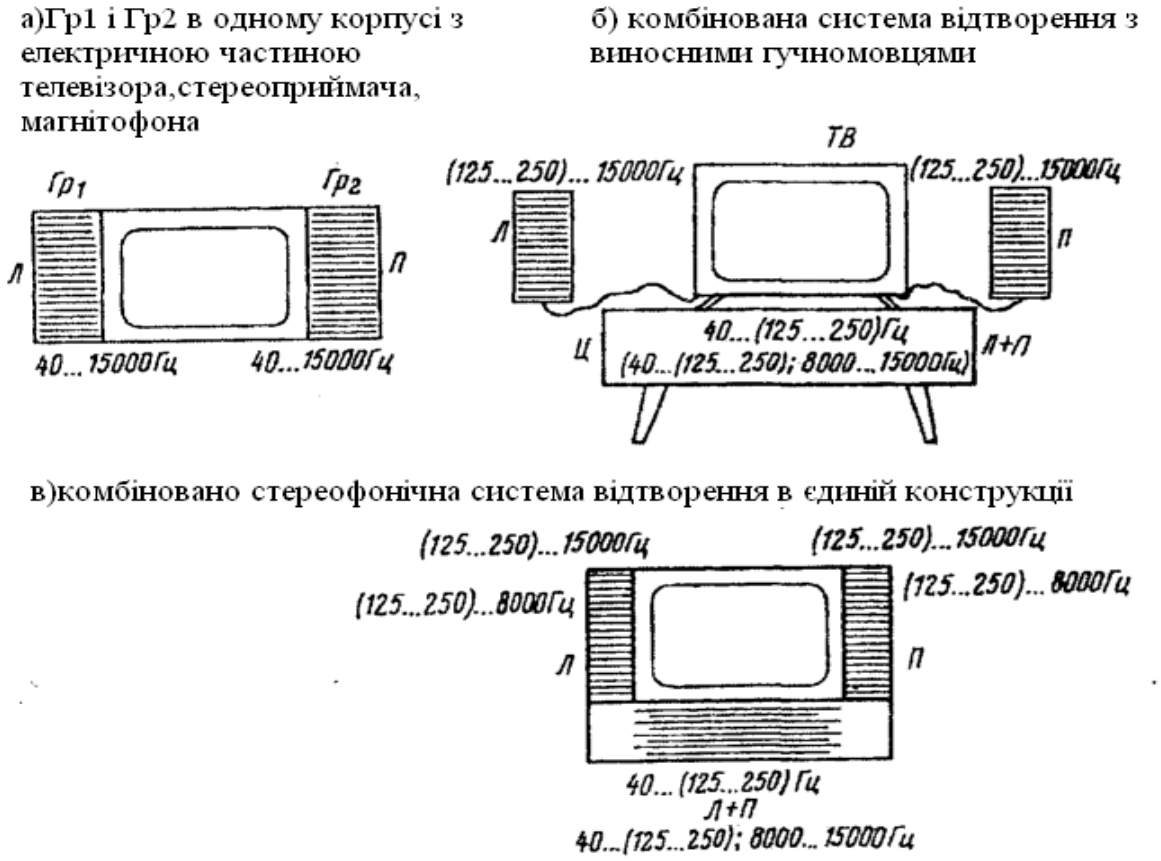


Рис.4.9. Варіанти побудови системи звуковідтворення звичайної стереофонічною системи

В інтересах задоволення різноманіття споживчих запитів комбінована система відтворення може бути в єдиній конструкції (рис. 4.9, в).

Знаходять застосування системи відтворення, які мають загальний канал наднизьких частот (від 20 ... 25 Гц до 80 ... 125 Гц) з гучномовцем «Subwoofer» і два гучномовці (Л і П), що працюють у смугах частот від 125 Гц до 18 ... 20 кГц. Така система може розташовуватися в будь-якому місці за бажанням слухача.

Поряд з гучномовцями для відтворення сигналів Л і П часто використовуються ***стереотелефони.***

На закінчення, ще раз відзначимо *дві особливості сигналів звичайної стереофонії:*

- сумісність - сума лівого і правого сигналів стереопари повинна давати повноцінне монофонічне звучання;
- лівий і правий сигнали стереопари містять як сигнали прямих звуків, так і їх реверберaційні продовження і мають приблизно однакове співвідношення енергій сигналів прямих і відбитих звуків у кожному з каналів стереопари.

Існують системи, в яких є *два канали передачі і більше двох каналів відтворення звукових сигналів.*

Двоканальне стереофонічне відтворення звуку хоча і має істотну перевагу перед монофонічним відтворенням, але все ж таки поступається звучанню в первинному приміщенні по наступним причинам:

- в даній системі обмежена зона дії ***стереоефекту***;
- локалізація звуку спостерігається переважно по фронту звучання і дуже незначна локалізація по глибині;
- слабке відчуття «ефекту зала».

Таким чином, при двоканальному стереовідтворенні просторовість звучання спостерігається тільки частково в межах сектора, обмеженого напрямками на акустичні системи. Тільки в цьому секторі «працює» механізм просторового демаскування слуху. *Повного відчуття просторовості звучання в даній системі не спостерігається.*

При виконанні музичних творів у залі слухач чує як прямі звуки, які виходять від музичних інструментів, так і звуки, відбиті від бічних і задніх стін залу, від стелі, від спеціальних відбивачів. Це в сумі і створює «ефект зала».

Повне відчуття просторовості звучання можливо тільки при використанні систем звукопередачі і відтворення з числом каналів більше двох.

Вирішальне значення для якісного сприйняття всіх супутніх стереофонічному ефекту ознак якості мають механізми просторового слуху людини, а саме механізми утворення ***уявних джерел звуку*** (УДЗ).

Уявні джерела звуку. Феномен утворення УДЗ полягає в наступному. Нехай слухач знаходиться *на рівних відстанях* від двох однакових динаміків, що *живляться одним і тим же сигналом*. Сумарні сигнали від обох гучномовців, досягаючи лівого і правого вуха слухача, не мають відмінностей. У слухача виникає *відчуття одного джерела звуку*, розташованого на середині відрізка лінії (званого базою), що з'єднує обидва гучномовця (*хоча звуки виходять від двох рознесених джерел*!): Це джерело-уявне (ввижається) (рис.4.10).

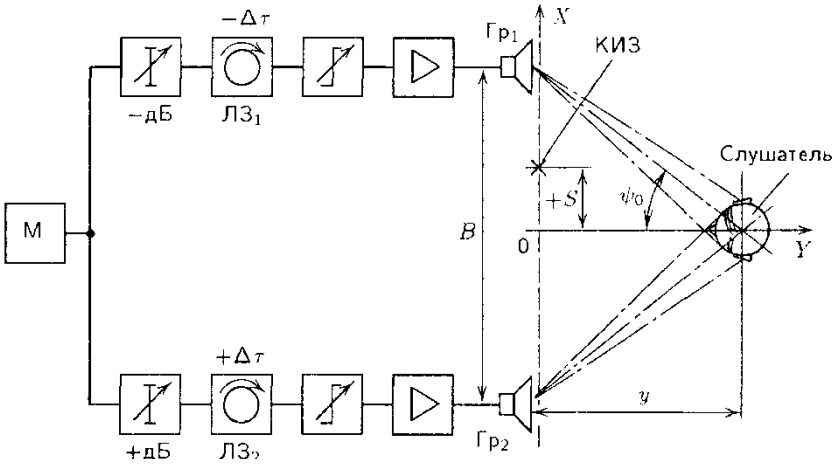


Рис.4.10. Експериментальна установка для дослідження локалізації УДХ (КИЗ)

Положення УДЗ може бути змінене, якщо вводити часовий зсув Δτ між випромінюваними сигналами або змінити рівень ΔN одного з них. Цей досвід демонструє можливість створення у слухача уявлень (відчуттів) про різних положеннях УДЗ за допомогою тільки двох відтворюючих пристроїв (гучномовців). Саме це явище використовується при стереофонічному

відтворенні для *створення услухачів ілюзії просторової звукової панорами*. Таким чином, ***стереоефект*** – це створення у слухача відчуття про різні положення УДЗ за допомогою двох та більше гучномовців (рис.4.11, рис.4.12).

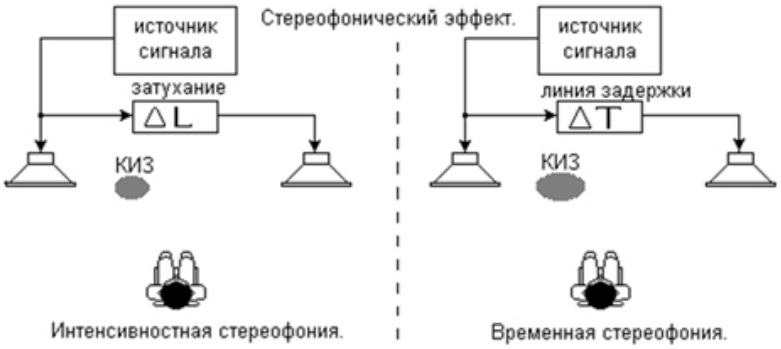


Рис.4.11 Стереофонічний ефект

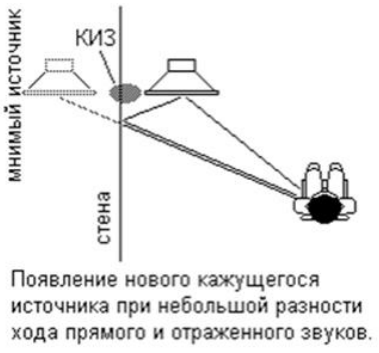


Рис.4.12 Утворення УДЗ

Відмінності за часом або інтенсивністю між сигналами, що досягають вух слухача, можуть бути обумовлені як властивостями стереосигнала ($\Delta\tau$ і ΔN), так і місцем розташування слухача відносно гучномовців ($\Delta\tau_{xy}$і ΔN_{xy}, мають на увазі координати точки спостереження, рис.4.11, рис.4.13). Звідси - явно виражена *залежність сприймаємого стереоефекту від місця розташування слухача*. Так, при збільшенні рівня сигналу від одного з гучномовців на 12 ... 30 дБ (або при наближенні цього гучномовця) УДЗ локалізується в напрямку саме цього гучномовця. Другий гучномовець локалізується як віддалений. Подібний же ефект спостерігається при введенні часової різниці між канальними сигналами $\Delta\tau$ = 0,3 ... 3 мс. Центр УДЗ зміщується у бік сигналу, який випереджає за часом.

Рис.4.13 Спотворення стереоефекту при зміщенні слухача

Сукупність УДЗ, що розрізняються за положенням в просторі, утворює ***стереопанораму***(рис.4.14).

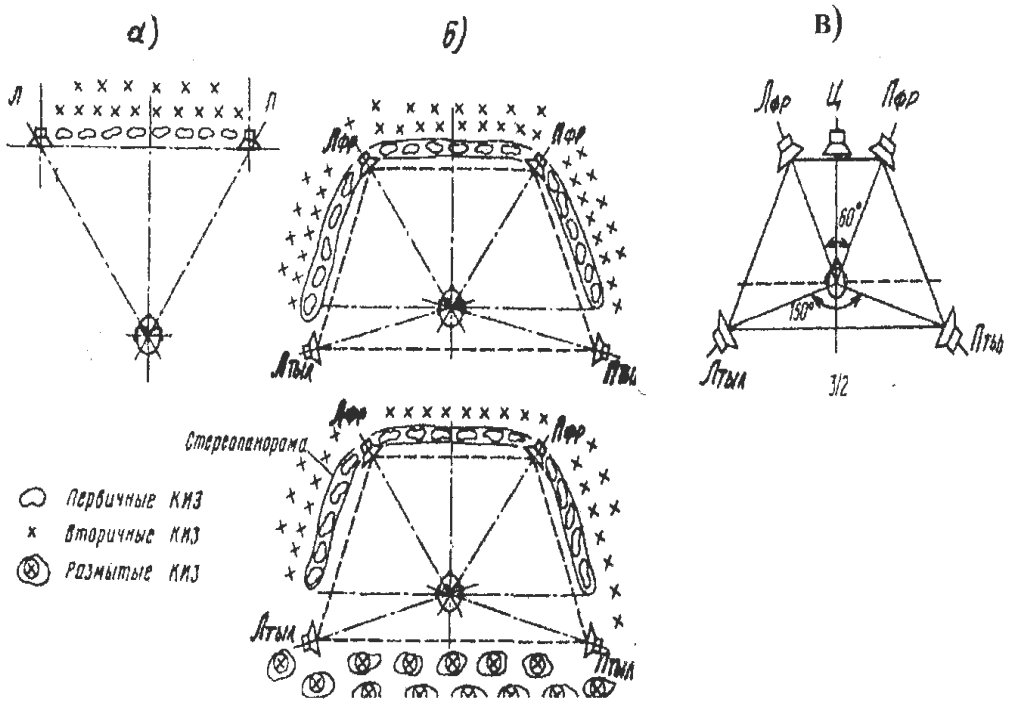


Рис.4.14. Разновидности стереопанорам двухканальнойстереофонии

УДЗ, суб'єктивно сприймається в результаті впливу на входи слухового аналізатора слухача звукових полів *багатоканальної звуковідтворювальної системи*, відноситься до категорії психофізіологічних явищ. Тому *вивчення особливостей сприйняття стереопанорами відноситься до питань не тільки технічної та музичної акустики, але також психології та фізіології слуху*. Нижче акцентовані переважно на технічній стороні питання.

Відзначимо, що варіювання величинами $\Delta\tau$ і ΔN (або інакше-кореляцією сигналів від гучномовців) може бути реалізовано, як на передавальній стороні (при формуванні двоканального стереофонічного сигналу; тут виявляється майстерність звукорежисури), так і на приймальній стороні (при відтворенні стереофонічного сигналу). При цьому канали передачі сигналів мовлення не повинні вносити недопустимих спотворень.

Отже, сам по собі *стереоефект визначається двома факторами-різницею в часі приходу звукового сигналу до лівого і правого вуха і різницею інтенсивностей цих сигналів* (див. бінауральні властивості слуху, п. 2.3.8).

Пояснимо, як формуються стереофонічні сигнали на стороні передачі. Нижче розглядається три варіанти формування стерео сигналів.

5. Способи формування стереосигналів

Система АВ. Її ідея ілюструється рис.4.15, а. Два мікрофона А і В з однаковими характеристиками розташовуються симетрично з двох боків студійного приміщення. Сигнали з виходів мікрофонів по окремих каналах надходять в приміщення слухача до двох гучномовців, розташованим ліворуч і праворуч відносно слухача.

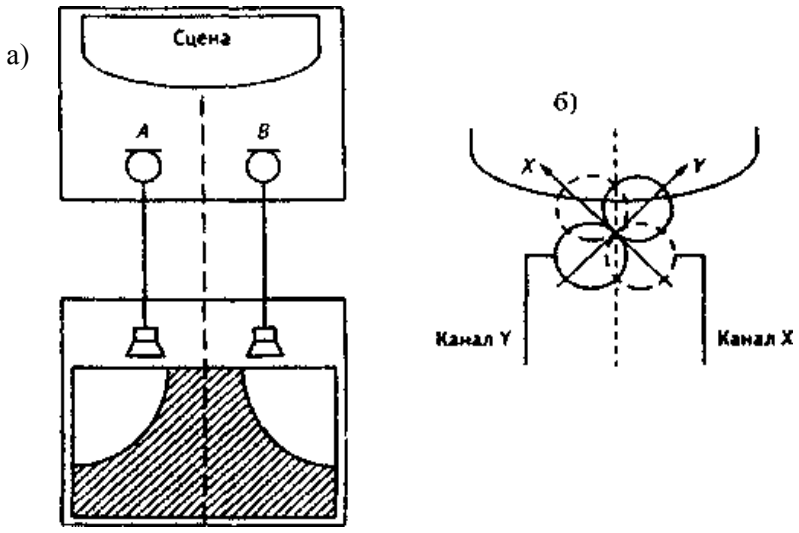


Рис.4.15. Мікрофонна система АВ (а) і мікрофонна система XY (б)

Стереофонічний ефект досягається тим, що звук, що приймається ближнім до джерела звуку мікрофоном, має більш високий рівень і випереджає за часом той самий звук, що приймається іншим мікрофоном. Це співвідношення рівнів і тимчасових зрушень зберігається і в звуках, відтворених відповідними гучномовцями для слухачів, що знаходяться в так званій зоні стереоефекту (на рис. 4.15, а заштрихована).

Поблизу гучномовців ця зона зосереджена біля осі, відносно якої розташовані гучномовці, і розширюється по мірі віддалення від них. Під час переміщення джерела звуку між мікрофонами змінюються рівні і часові зрушення звуків, які сприймаються мікрофонами. Відповідно змінюються умови відтворення звуків у приміщенні для прослуховування. На слух це буде сприйматися як переміщення УДЗ між гучномовцями.

Дана система успішно відтворює місцезнаходження звуку по фронтах розташування мікрофонів і значно гірше - глибину звукового поля. У системі можуть використовуватися мікрофони з діаграмами спрямованості у вигляді кола, вісімки чи кардіоїди. Відстань між мікрофонами і їх кількість підбирається експериментально.

Зрозуміло, що *таку систему важко поєднати з монофонічною*. (Нагадаємо, що сумісність стереофонічних і монофонічних систем є обов'язковою!). Насправді, при сумуванні сигналів (для передачі по одному каналу), які приймаються мікрофонами А і В неминучі частотні спотворення, пов'язані з різницею ходу звукових хвиль від джерела звуку до кожного з мікрофонів, отже з інтерференційними ефектами. Якщо різниця ходу хвиль складе 180°, то в монофонічному сигналі звук цієї частоти буде взагалі відсутній.

Для усунення інтерференційних ефектів розроблені сполученні мікрофонні системи (**стереомікрофони**), в яких стереоефект формується *тільки за рахунок різниці рівнів сигналів*. Мікрофони в таких системах повинні мати різні (або по-різному орієнтовані) діаграми спрямованості.

Система XY. У даній системі (рис. 4.15,б) два мікрофони з однаковими характеристиками та діаграмами спрямованості у вигляді «вісімки» розташовуються практично в одній точці так, щоб їх осі діаграм спрямованості утворили кут 90°.

Мікрофони по каналах звукопередачі Y і X з'єднані з лівим Л і правим П гучномовцями (на рис.4.15, б гучномовці не показані). Стереофонічний ефект тут виходить за рахунок різної (обумовленої діаграмою спрямованості) чутливості мікрофонів до звукових хвиль, що приходять від джерел звуку.

Так, звучання інструменту, що знаходиться в напрямку осі **X** буде сприйнято тільки одним мікрофоном, а інструменту, що знаходиться в середині сцени (на осі симетрії), буде сприйнятий обома мікрофонами з рівною інтенсивністю. Зсуву фаз між звучанням гучномовців при розташуванні мікрофонів в одній точці немає. Тому ефект локалізації джерела звуку буде приглушений.

При звукопередачі система XY є *більш сумісною з монофонічною*, ніж система AB. Однак, джерела звуку розташовані в центрі сцени, мають підвищену гучність і при монофонічному відтворенні здаються більш наближеними до слухача. Отже, систему XY доцільно застосовувати при запису нерухомо розташованих виконавців. При цьому центральні джерела звуку знаходяться подалі від мікрофона.

Система MS (рис. 4.16, а) названа по перших літерах німецьких слів Mittel (середина) і Seite (сторона). Як і в системі XY мікрофони розташовуються в центрі сцени. Однак, один мікрофон (M) - з круговою діаграмою спрямованості (однаково сприймає звуки з усіх боків), а інший (S) - з діаграмою спрямованості у вигляді «вісімки» (сприймає звуки з бокових частин сцени).

У пункті прослуховування джерело звуку «переміщується» з одного гучномовця в інший, створюючи ілюзію присутності слухача в місці розташування реального джерела звукової програми.

Зміни напруги на виходах мікрофонів в залежності від кута приходу звуку показані на рис. 4.16, в. Для мікрофона M напруга завжди постійно, а на виході мікрофона S напруга максимальна лише для приходу звуку з напрямків - 90 ° і + 90 °. При куті 0° напруга на виході мікрофона S дорівнює нулю. При переході від одного пелюстка діаграми спрямованості до іншого змінюється фаза вихідного сигналу мікрофона (відбувається зміна полярності напруги).

У канал звукопередачі до лівого гучномовця Л подається сума напруг від обох мікрофонів ($U_M + U_s$), а до правого П - різниця напруг ($U_M - U_s$). Поділ лівого і правого сигналів стереопари проводиться за допомогою сумарно-різницевого перетворювача. Залежність сигналів Л = ($U_M + U_s$) і П = ($U_M - U_s$) від напрямку на джерело звуку показана на рис. 4.16,б.

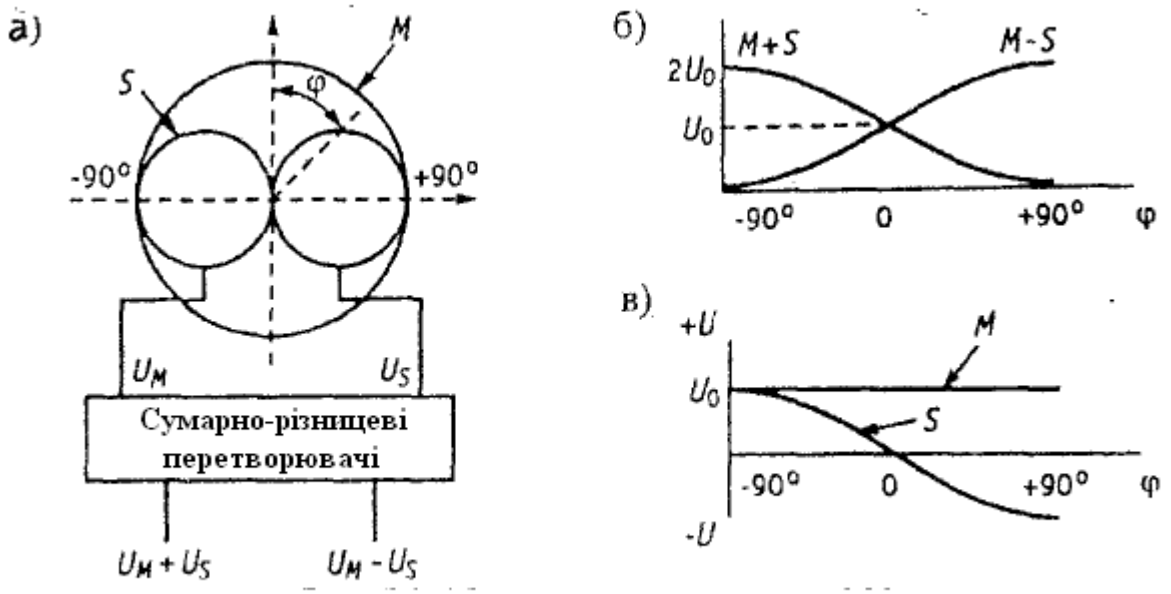


Рис.4.16. Мікрофонна система MS

Система MS має явні переваги. Канал М є повноцінним монофонічним каналом, тобто система сумісна з монофонічною (сумарний сигнал Л + П прослуховується через монофонічний гучномовець).

Крім того, звукорежисер в процесі формування сигналів стереопари може електричним шляхом (за допомогою регуляторів) змінювати співвідношення сигналів і тим впливати на стереоефект. У системі XY довелося б повертати самі мікрофони.

Питання для самоконтролю

1. Дайте характеристику моделі формування емоційної реакції слухача на звуковий вплив при оцінці якості звучання.
2. Зобразіть і дайте коментар узагальненої структури звукової системи радіомовлення та телебачення.
3. Зобразіть і дайте коментар структури монофонічної системи звукопередачі.
4. Що таке уявні джерела звуку? Яка фізична сутність цього явища? Як формуються здаються джерела звуку в приміщенні слухача?
5. Зобразіть і дайте коментар структури звичайної двоканальної стереофонічною системи.
6. Дайте характеристику способам формування стерео сигналів у студійному приміщенні з систем АВ, XY і MS.
7. Дайте характеристику формату звуковідтворення звичайної двоканальної стереофонічної системи.

ДОДАТОК Г. РИСУНКИ ДО ЛЕКЦІЇ №4

Рис.5.2. Обобщенная структурная схема систем звукопередачи

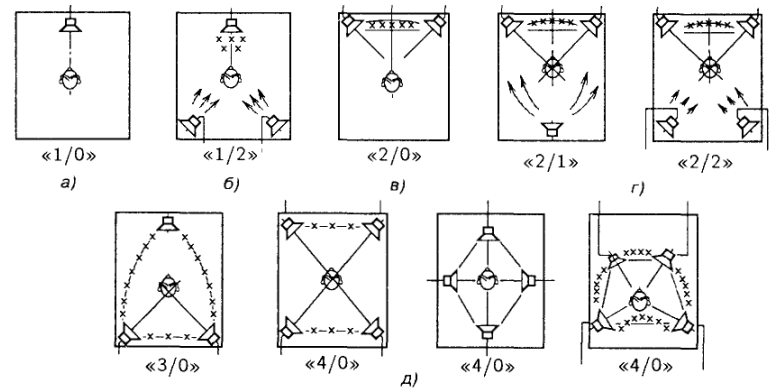


Рис. 9.4. Основные звуковые форматы и системы воспроизведения: *а* — система воспроизведения монофонической звукопередачи, звуковой формат «1/0»; *б* — система воспроизведения квазистереофонической звукопередачи, формат «1/2»; *в* — система воспроизведения обычной стереофонической звукопередачи, формат «2/0»; *г* — системы воспроизведения стереоамбиофонической звукопередачи, форматы «2/1» и «2/2»; *д* — системы воспроизведения матричных стереофонических звукопередач, форматы «3/0» и «4/0»

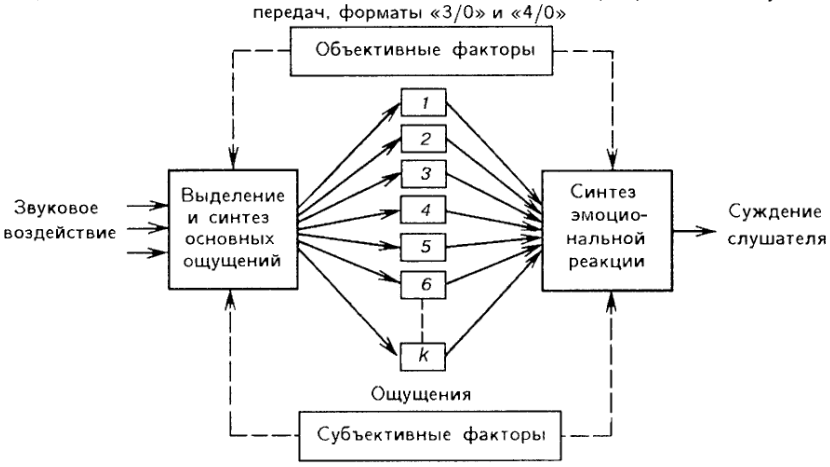


Рис. 9.2. Обобщенная модель формирования эмоциональной реакции слушателя на звуковое воздействие

Таблица 9.1

Признак качества	Номер группы i	ω_i'	ω_i''
1. Ширина звуковой панорамы	1	0,13	0,24
2. Объемность звучания	2	0,14	0,9
3. Прозрачность, четкость, раздельность звучания различных инструментов или их групп	3	0,2	0,09
4. Естественность и богатство тембров инструментов и голосов	4	0,22	0,17
5. Передача басовых звуков оркестра без излишней гулкости	5	0,18	0,15
6. Заметность шумов и помех	6	0,12	0,04
7. Слишком общий термин, не относящийся к одной из этих групп	7	0,01	0,21

Рис. 9.7. Структурная схема монофонической системы звукопередачи

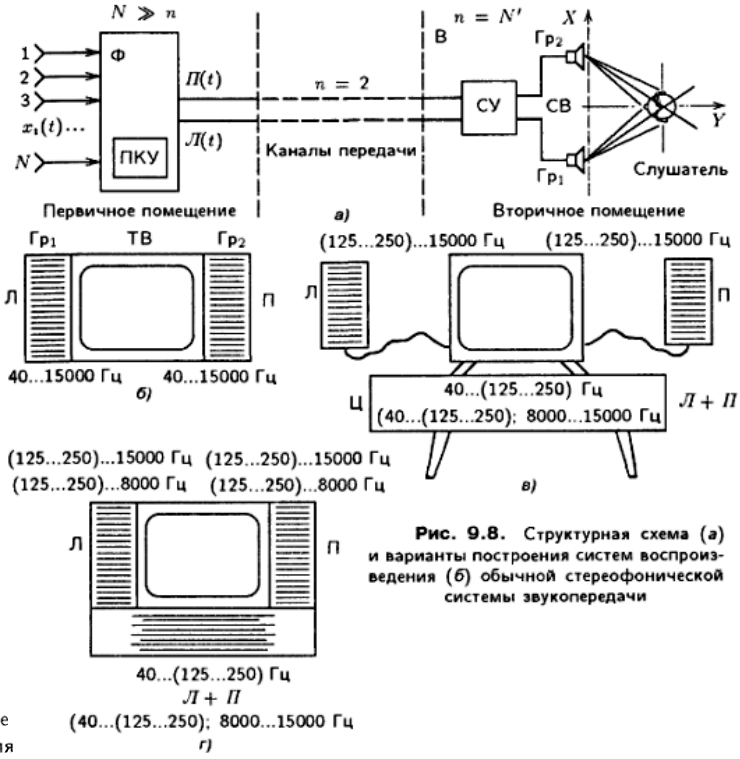


Рис. 9.8. Структурная схема (*а*) и варианты построения систем воспроизведения (*б*) обычной стереофонической системы звукопередачи

Таблица 9.3

Компонента стереоэффекта	Значимость w_i для	
	квалифицированных экспертов	обычных слушателей
Пространственное впечатление, ширина панорамы, объемность звучания	0,27	0,34
Прозрачность звучания (ясность, четкость)	0,2	0,03
Естественность и богатство тембров, гулкость басов	0,4	0,32
Чистота звучания	0,12	0,04

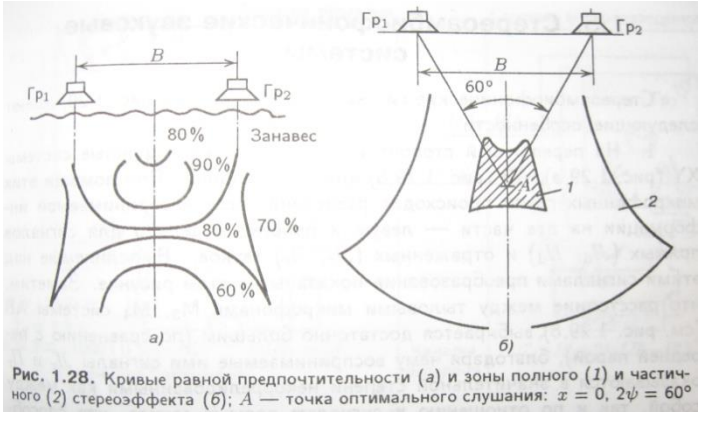


Рис. 1.28. Кривые равной предпочтительности (*а*) и зоны полного (*1*) и частичного (*2*) стереоэффекта (*б*); A — точка оптимального слушания: $x = 0$, $2\psi = 60°$

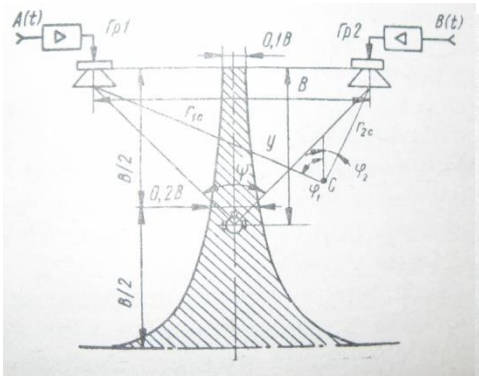


Таблица 1.2

Полоса воспроизводимых частот, Гц, для звуковоспроизведения		Предпочтительность, %
монофонического	стереофонического	
30...15 000	30...15 000	85
	50...10 000	85
	100...6400	64
50...10 000	50...10 000	85
	100...6400	75

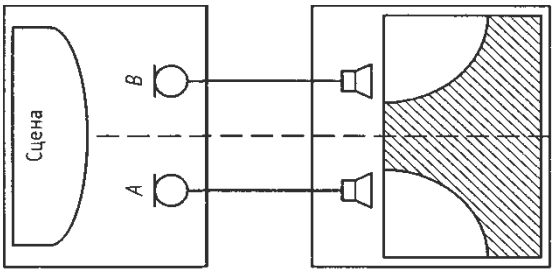


Рис. 3.3. Микрофонная система АВ

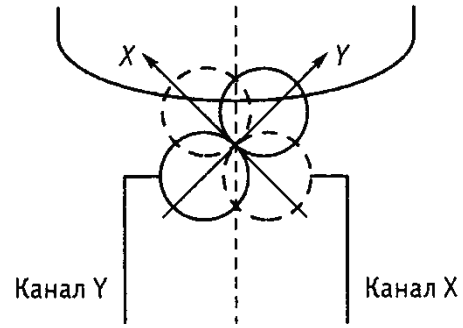
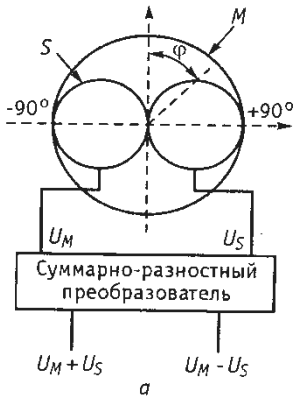


Рис. 3.4. Микрофонная система XY



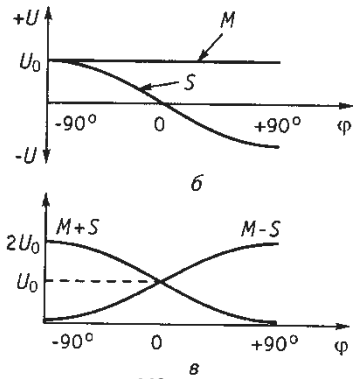


Рис. 3.5. Микрофонная система MS

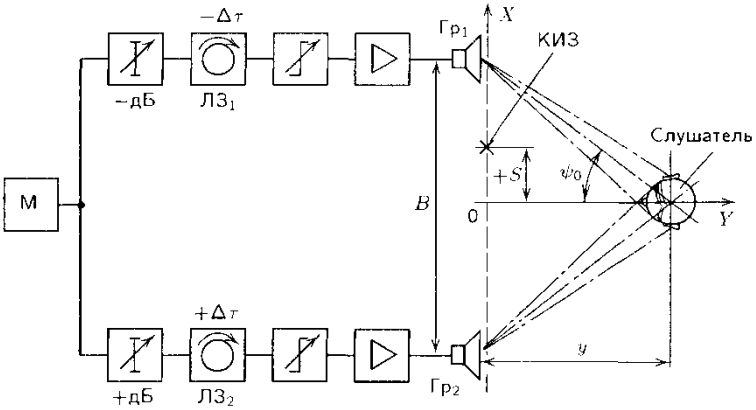


Рис.3.6. Экспериментальная установка для изучениялокализации КИЗ

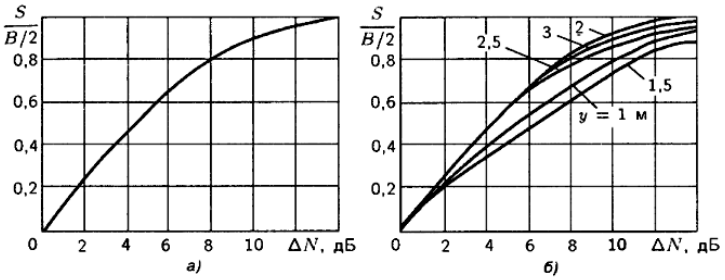
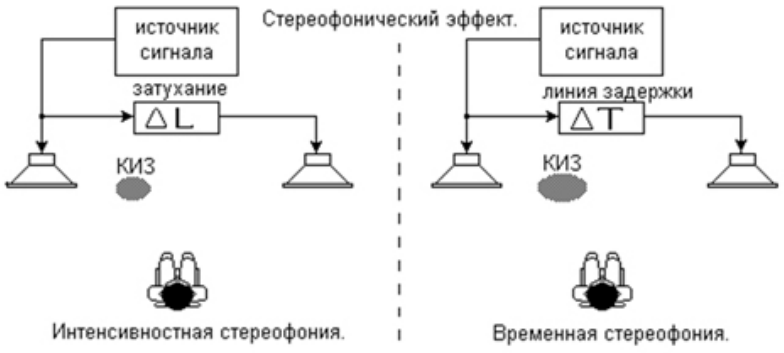
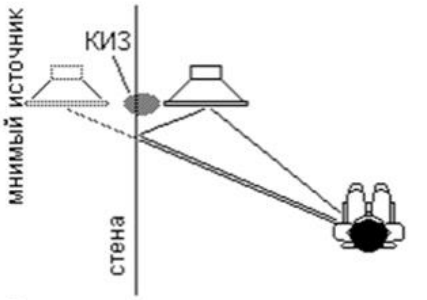


Рис. 9.11. Зависимость относительного смещения КИЗ от разности уровней при $\Delta\tau = 0$ и $x = 0$





Появление нового кажущегося источника при небольшой разности хода прямого и отраженного звуков.

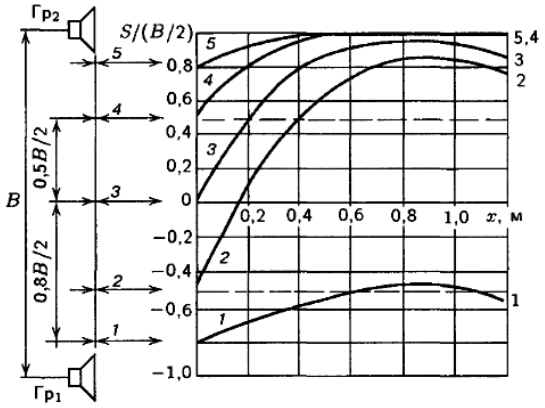


Рис. 9.18. Пространственные искажения стереопанорамы при боковом смещении слушателя относительно громкоговорителей (B = 1,8 м; y = 1,5 м)

Искажение сттереоэффекта при смещении слушателя.

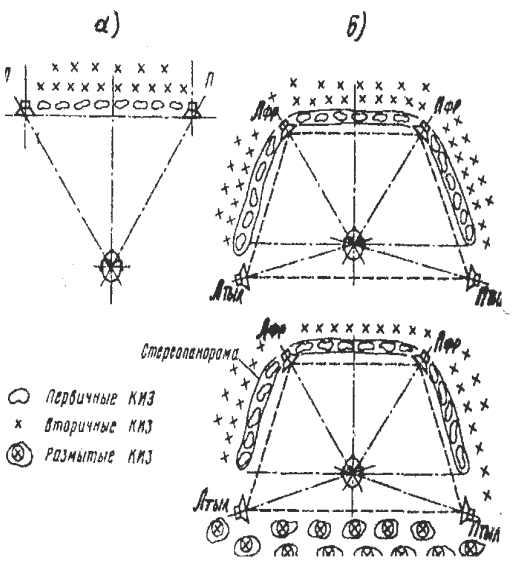


Рис.3.7. Разновидности стереопанорамдвухканальнойстереофонии

ЛЕКЦІЯ №5 БАГАТОКАНАЛЬНІ СТЕРЕОФОНІЧНІ СИСТЕМИ

ЛІТЕРАТУРА:

- Брагин А.С. Технологии вещательных служб. Часть 1. Технологии звукового радиовещания. –К.: НТУУ «КПИ», 2006.
- Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов./Под ред. Ю. А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком., Радио и связь, 2007. – 872 с.

РОЗДАТНИЙ МАТЕРІАЛ: див. ДОДАТОК Д

1. Багатоканальні стереофонічні системи

1.1 Загальні відомості

Бажання втілити в життя звуковий формат, здатний повною мірою передавати просторовість звукових образів, послужило стимулом до створення в 70-х роках минулого століття так званої «***квадрофонії***». Цей формат призначався для домашнього користування і представляв систему з чотирма каналами звуковідтворення. Винахідником квадрофонії вважається П. Шойбер, який в 1972 році запатентував основні принципи матричних схем звуковідтворення.

У ***багатоканальних системах*** кількість каналів передачі між первинним і вторинним приміщенням більше двох. Більша кількість необхідних каналів «обслуговує» більшу кількість пар «мікрофон (в студії) - гучномовець (у приміщенні слухача)». Для кожної пари може надаватися свій канал передачі (або канал передачі містить сигнали двох каналів звукозапису).

На рис. 5.1,а зображено розташування мікрофонів в приміщенні запису, а на рис. 5.12,б - розташування гучномовців в приміщенні відтворення. Узагальнена оцінка якості звучання Q досліджених варіантів систем наведена на рис. 5.12, в. Вона виконана згідно (5.1) за моделлю

$$Q = 0{,}253F_1 + 0{,}365F_2 + 0{,}161F_3,$$

де F_1 - глибина звукових образів, F_2 - повнота звучання, F_3 - ясність звучання.

Вагові коефіцієнти відображають важливість кожної з ознак якості *просторового сприйняття*.

По осі абсцис відкладений порядковий номер системи. «Нульова» система - монофонічна. За базовий варіант при порівняльному прослуховуванні прийнято звучання звичайної стереофонічною системи: для неї Q = 0. Розташування мікрофонів і гучномовців прийнято однаковим. Кожен мікрофон зв'язаний окремим каналом з відповідним гучномовцем.

Результати експертиз показують, що:

- збільшення числа роздільних каналів передачі підвищує якість звучання; кращими варіантами багатоканальних систем виявились 6-ий, 7-ий і 11-ий; їх впровадження може забезпечити новий якісний стрибок у розвитку радіомовлення, телебачення та кінематографу;

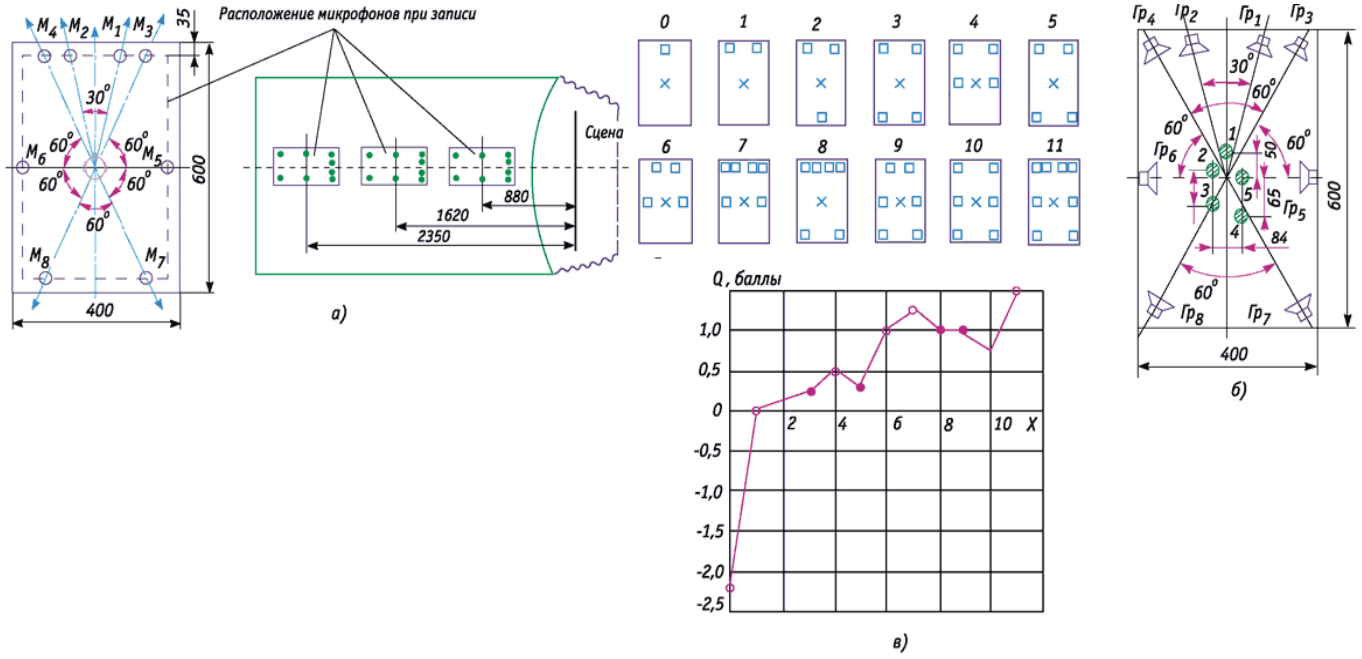


Рис.5.1. Розміщення мікрофонів(а), гучномовців(б) для дослідження варіантів (0.1…11) багатоканальних стереофонічних систем і узагальнена оцінка якості їх звучання(в)

- для кожного числа роздільних каналів передачі існує свій оптимальний (з позицій просторового слуху людини) варіант розміщення гучномовців в приміщенні прослуховування, що забезпечує гранично досягаєму для даного числа каналів якість звучання Q.

Квадрафонічні системи звуковідтворення створюють враження «ефекту залу»: передні (фронтальні) гучномовці відтворюють оркестр, а задні (тилові) - оплески і реверберації в залі, а також враження польоту над головами слухачів спереду назад.

Випробувано ряд способів синтезування квадрофонічного звука в ***повних квадрафонічних***, ***квазіквадрафонічних (матричних)*** та ***псевдоквадрафонічних системах***. Або інакше: квадрафонія отримала розвиток за трьома напрямками. Нижче надається їх коротка характеристика.

1.2. Повна квадрафонія

Повна квадрафонія (система 4-4-4: чотири канали запису + чотири канали передачі + чотири канали звуковідтворення) найкращим чином реалізує переваги квадрафонії, оскільки володіє властивістю *повної незалежності каналів* один від одного. Тому отримала паралельну назву - *дискретна*.

Функціонування системи повної (дискретної) квадрофонії проілюструємо на прикладі системи, яка одержала найбільше поширення, **системи грамзапису CD-4** (Compatible Discrete 4), сумісної з одноканальними і двоканальними системами

звуковідтворення. Вона була стандартизована в США і Японії та існувала на споживчому ринку.

Автор ідеї - японський інженер Іноуе (фірма JVC). Ідея полягає в тому, що на кожній стороні звукової канавки грамплатівки записується складний сигнал, який містить звукову і надзвукових складові. Звукова складова спектру кожного з цих сигналів представляє *суму* двох лівих (фронтального і тилового LF + LS) або відповідно до двох правих (RF + RS) сигналів. Надзвукові складові являють собою модульовані за частотою піднесучої 30 кГц різності тих самих сигналів (LF - LS і RF - RS), рис. 5.2.

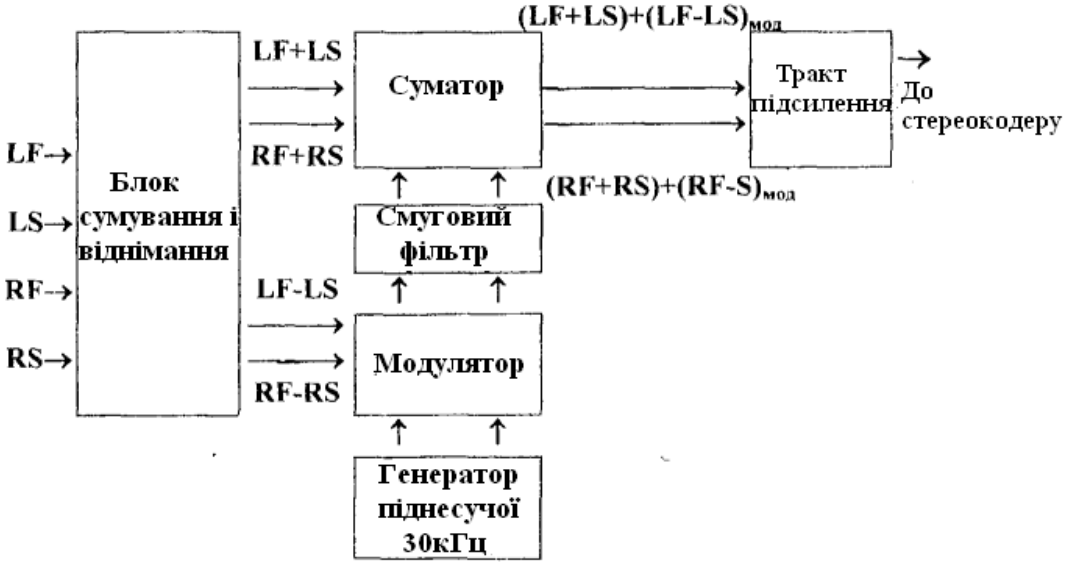


Рис. 5.2 Структурна схема пристрою запису квадрафонічних програм у форматі CD-4.

Як джерело сигналів використовувався чотирьохдоріжковий магнітофон.

У блоці сумування і віднімання з сигналів (LF і RF) двох фронтальних мікрофонів і сигналів (LS і RS) двох тилових мікрофонів утворюються чотири інших сигнали - два сумарних (LF + LS, RF + RS) і два різницевих (LF-LS, RF - RS).

Різницеві сигнали подаються на модулятори, де «пересідають» на піднесучі коливання 30 кГц.

Отримані після модуляції нижня бічна смуга шириною 10 кГц і верхня бічна смуга шириною 15 кГц займають смугу частот 20 ... 45 кГц. Щоб отримати кращий розподіл частот між сумарними та різницевих сигналами, нижня бокова смуга формується в дещо врізаному вигляді.

Звукові сигнали в смузі частот 800 ... 6000 Гц модулюють піднесучу 30кГц по фазі, а сигнали нижче 800 Гц і вище 6000 Гц-за частотою, оскільки (як виявлено в ході досліджень) *застосування двох видів модуляції підвищує якість передачі,* модульовані різницеві сигнали і , ослаблені за рівнем на 19 дБ щодо рівня сумарних сигналів, після проходження через смуговий фільтр надходять на суматор, який з чотирьох вхідних сигналів формує два вихідних, що містять як

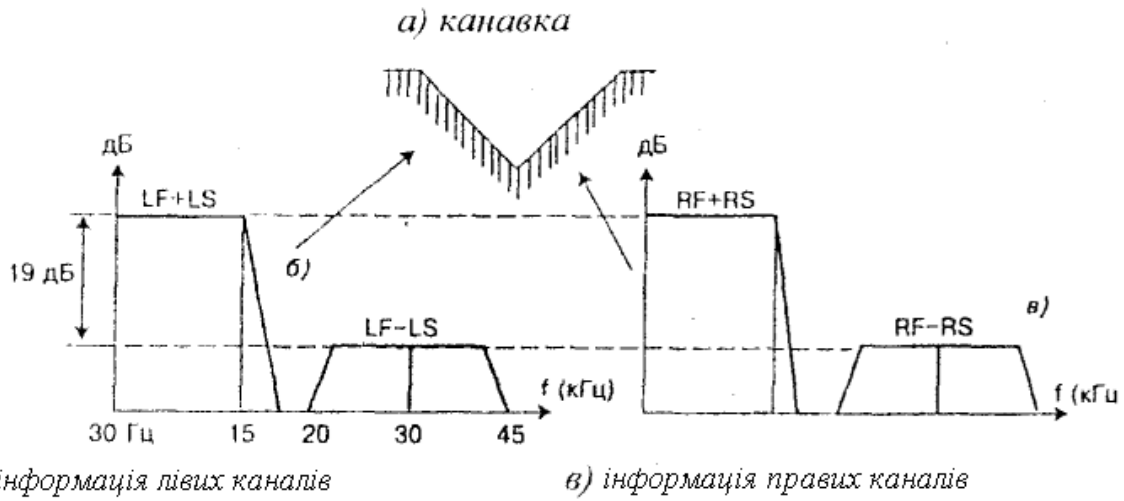
звукову, так і надзвукових складові. Сформовані таким чином сигнали підсилюються для подальшої подачі на стереокодер.

У процесі запису різець стереокодеру робить коливання, аналогічні за напрямком коливань при двоканальному стерео запису 45/45, рис. 5.3.

Ліва стінка канавки містить запис комбінованого сигналу від лівих мікрофонів, а права - комбінованого сигналу від правих мікрофонів. Подібне розміщення сигналів, коли на лівій стінці записуються тільки сигнали від лівих мікрофонів (переднього і заднього), а на правій стінці - тільки від правих мікрофонів (переднього і заднього) при рівні сигналів з частотним діапазоном 30 ... 15000 кГц, що перевищує рівень надзвукових сигналів, забезпечує сумісність платівок CD-4 з двоканальними пластинками.

Відтворення квадрофонічного звучання повинно проводитися на відповідному (квадрофонічному) програвачі зі спеціальним декодером, який відновлює з двох комбінованих сигналів і сформованих звукознімачем , чотири вихідних сигналу LF, LS, RF і RS.

Після підсилення до необхідного рівня ці сигнали направляються до відповідних акустичних систем, рис. 5.4.



б) інформація лівих каналів *в) інформація правих каналів*

Рис.5.3. Розміщення квадрофонічної інформації на стінках канавки при запису по методу **CD-4**

В демодуляторі відбувається відділення сумарних сигналів (LF + LS) і (RF + RS) від модульованих різницевих і (LF − LS) і (RF − RS).

Далі різницеві сигнали демодулюються → (LF-LS) і → (RF-RS) і після поділу надходять на блок сумування і віднімання. Після блоку сумування відновлюються вихідні (окремі) сигнали за алгоритмом

$$LF = (LF + LS) + (LF\text{-}LS),$$
$$RF = (RF + RS) + (RF\text{-}RS),$$
$$LS = (LF + LS) - (LF\text{-}LS),$$
$$RS = (RF + RS) - (RF\text{-}RS).$$

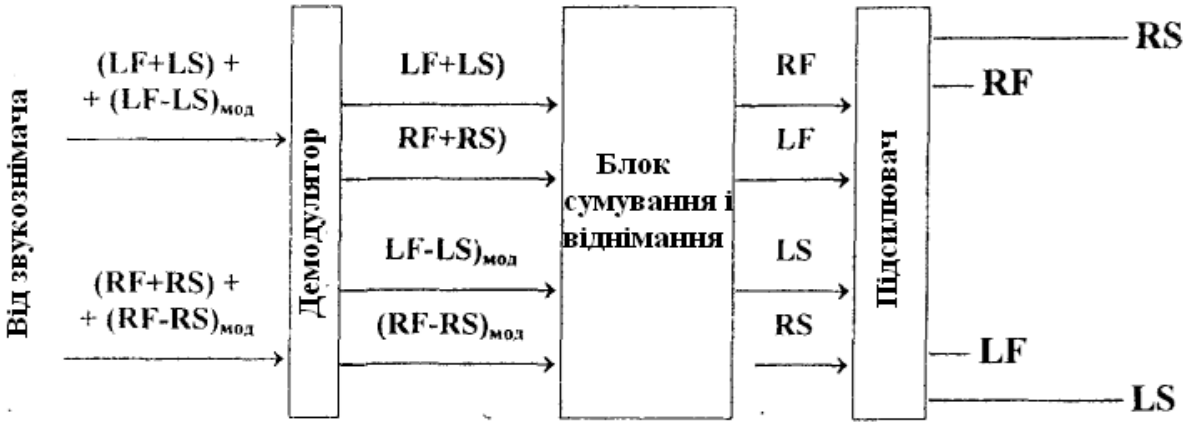


Рис.5.4 Схема пристрою відтворення квадрофонічних фонограм по методу **CD-4**

Отримані розділені сигнали підсилюються і після корекції їх амплітудно-частотних характеристик подаються на відповідні їм акустичні системи.

При програванні такої квадрофонічної платівки звичайний стереопрогравач відтворює тільки звукові частини спектрів: (LF + LS) у лівому каналі і (RF + RS) - у правому. Монофонічний програвач відтворює суму всіх чотирьох звукових складових (LF + LS + RF + RS). Таким чином, досягається закладена в назві **повна** сумісність системи CD-4 як з системами відтворення стерео записів, так і з монофонічними програвачами.

Система CD-4 забезпечує перехідні загасання між лівими і правими каналами порядку **25** дБ, а між передніми і тиловими-порядку **20** дБ.

Незважаючи на свої переваги, комерційного успіху не отримала не стільки через дорожнечу звуковідтворювальних систем, скільки через провал звукорежисерської філософії. Відповідно до згаданої філософії слухача намагалися «посадити» прямо в центр музичного колективу, виконуючого записаний твір. У подібній позиції на меломана обрушувалися звуки з усіх боків. Він мимоволі починав крутити головою, то прагнучи ухилитися від гучного удару великого барабана десь позаду себе поряд з правим вухом, то від грому литавр біля лівого вуха, то від істеричних вигуків екзальтованої солістки, яка, здавалося, вже добудовувалася до нього на коліна. У невеликих кількостях це кумедно, але все-таки стандартний слухач більше звик до того, що музиканти разом зі своєю зухвало гарною, але надто галасливої співачкою розташовуються десь попереду нього на сцені, а не обступають з усіх сторін. як циганки примічену гострим оком і тут же взяту «в оборот» слабохарактерну жертву.

Автор [10] виклав свої враження від прослуховування експериментальних записів повної квадрафонії так. «Дуже ефектно сприймався запис мелодії в темпі вальсу, зроблена таким чином, що звучання оркестру і голоси співачок переходили по колу від однієї акустичної системи до іншої, і сидячому в кріслі слухачеві здавалось, що він сам стрімко кружляє у вальсі з чарівною партнеркою. Захоплююче відчуття! Але такий прийом можна використовувати тільки для цілком певних цілей, створюючи у слухача *незвичайність* відчуттів.

У більшості ж випадків слухачеві хочеться просто спокійно відпочити, слухаючи приємну музику від якісної звуковідтворювальної системи. Потреби перебувати в центрі ансамблю у нього не виникає. Такий стан слухача придатний для кіно, коли сюжет фільму вимагає такого відчуття у *глядача*, щоб він в даній ситуації відчував себе одним з діючих осіб певної сцени ».

Для домашнього ж прослуховування музичних записів без відео сюжету така ситуація протиприродна і відчуття комфорту не створює.

1.3 Стереоамбіфонічні системи

Стереоамбіфонічні (інакше - квазіквадрафонічні, матричні системи) припускають чотири канали записи + два канали передачі + чотири канали звуковідтворення (система 4-2-4). Чотири сигнали з первинного приміщення перетворяться спеціальними матрицями в два сигнали, які і надходять на передаючий або записуючий пристрій. На приймальному (відтворюваному) кінці після зворотного матричного перетворення знову відновлюються чотири сигналу. Розглянемо ці процеси докладніше.

На передавальної стороні використовується мікрофон системи XY: два стерео мікрофони - передній (фронтальний) та тильний. За допомогою цих мікрофонних груп відбувається поділ всієї сприйманої інформації (чотири сигнали) на дві частини - ліву і праву, окремо для сигналів прямих ($\mathbf{Л_{пр}}$ та $\mathbf{П_{пр}}$) і відбитих ($\mathbf{Л_{відобр}}$ і $\mathbf{П_{відобр}}$) звуків.

Далі з чотирьох сигналів $\mathbf{Л_{пр}}$ та $\mathbf{П_{пр}}$, $\mathbf{Л_{відобр}}$ і $\mathbf{П_{відобр}}$ необхідно математично скомбінувати ці сигнали так, щоб створити *два нових* (кодованих, матріційованних) сигнали – лівий **Л** і правий **П**, які б мали *стереофонічну і монофонічну сумісність,* тобто можливість звуковідтворення (прослуховування) як «моно», так і «стерео».

Згадана умова повинна виконуватися в процесі кодування (а не декодування!), щоб слухачам, які мають двоканальну стереофонічну і монофонічний апаратуру, не було потрібно купувати додаткові блоки (приставки, декодери).

Принцип застосування матричного кодування *особливо важливий у стереофонічному радіомовленні*, так як передачі можуть проводитися за допомогою існуючої мережі радіостанцій. Спрощена ідея матриціювання може бути представлена рис.5.5.

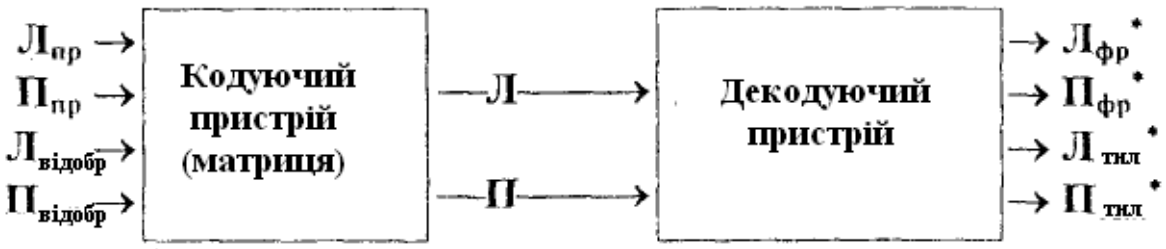


Рис. 5.5. До пояснення ідеї матриціювання

Формула кодування сигналів:

$$\mathbf{Л} = \mathbf{a}\,Л_{пр} + \mathbf{b}\,П_{пр} + \mathbf{c}\,Л_{відобр} + \mathbf{d}\,П_{відобр}$$
$$\mathbf{П} = \mathbf{b}\,Л_{пр} + \mathbf{a}\,П_{пр} + \mathbf{d}\,Л_{відобр} + \mathbf{c}\,П_{відобр}$$

Коефіцієнти **a**, **b**, **c** і **d** (що утворюють матрицю) можуть бути, як позитивними, так і негативними, а величина їх може лежати в межах від 0 до 1. Їх вибір неоднозначний. Якщо всі чотири коефіцієнта рівні 1, то слухач почує від лівого і правого гучномовців одне й те саме (стереоефект буде втрачено). При **a** = + 1 і **b** = **c** = **d** = 0 немає інформації від тилових гучномовців. Від вибору коефіцієнтів залежить поділ між каналами під час відтворення, а отже, якість звучання.

Аналогічну формулу для декодування (відновлення) сигналів з сигналів Л і П на приймальній стороні можна записати у вигляді:

$$\mathbf{Л_{фр}}^* = \mathbf{e}\,\mathbf{Л} + \mathbf{f}\,\mathbf{П},$$
$$\mathbf{Л_{тыл}}^* = \mathbf{f}\,\mathbf{Л} + \mathbf{e}\,\mathbf{П},$$
$$\mathbf{П_{фр}}^* = \mathbf{g}\,\mathbf{Л} + \mathbf{h}\,\mathbf{П},$$
$$\mathbf{П_{тыл}}^* = \mathbf{h}\,\mathbf{Л} + \mathbf{g}\,\mathbf{П}$$

Коефіцієнти e, f, g, h, як і коефіцієнтами кодування, можуть бути позитивними чи негативними, а їх величина - від нуля до одиниці.

Якщо підставити у формули відновлюваних сигналів значення для кодованих сигналів та вирішити ці рівняння, то виявиться, що будь-який відновлений сигнал (**$Л_{фр}$***, **$Л_{тыл}$***, **$П_{фр}$***, **$П_{тыл}$***) містить частину інформації від трьох інших первинних сигналів. Наприклад, для лівого фронтального сигналу:

$$Л_{фр}^* = (\mathbf{e\,a} + \mathbf{f\,b})Л_{пр} + (\mathbf{e\,b} + \mathbf{f\,a})П_{пр} + (\mathbf{e\,c} + \mathbf{f\,d})Л_{отр} + (\mathbf{e\,d} + \mathbf{f\,c})П_{отр}$$

При виборі коефіцієнтів кодування та декодування слід прагнути до того, щоб первинні сигнали відтворювались без втрат якості звучання (по можливості, з мінімізацією «підмішування» сигналів з інших первинних каналів; наприклад, щоб **$Л_{фр}$*≈ $Л_{фр}$**) і щоб були передані художні задуми, закладені в записі.

Різними фірмами запропоновано велику кількість варіантів для вибору згадуваних коефіцієнтів. Один з варіантів стереоамбіфонічної системи з мікрофонною системою XY представлений на рис. 5.6, а.

Схема кодуючої матриці пояснень не вимагає. На приймальній стороні системи сигнали Л і П відтворюються (після декодування) парою фронтальних гучномовців $Л_{фр}$*, $П_{фр}$* та тильною парою гучномовців $Л_{тыл}$*, $П_{тыл}$*. Регулюванням величини затримки $\Delta\tau$ можна змінювати час реверберації. Відповідні сигнали повинні надходити на тилові гучномовці: реверберуючий звук, що йде позаду надходить трохи пізніше, ніж звук від передніх гучномовців.

Включення в ланцюг тильної пари гучномовців (або одного, рис. 5.6,б) додаткової лінії затримки, ревербератора (Ревер.) і частотного коректора істотно впливає на якість сприйняття: підвищується об'ємність, прозорість звучання, стає можливою оперативна зміна акустичних умов прослуховування і «перенесення слухача» в приміщення з різними акустичними F властивостями.

Стереоамбіфонічні системи поєднують в собі переваги! звичайної стереофонічної і квазістереофонічної системи звукопередачі. Вони здатні в рівній мірі донести до слухачів інформацію про акустичну атмосферу первинного приміщення (студії, концертного залу) та про просторове розміщений! "Інструментів ансамблю по фронту і глибині з збереженням впевненої чіткої локалізації КІЗ в межах бази фронтальної пари гучномовців.

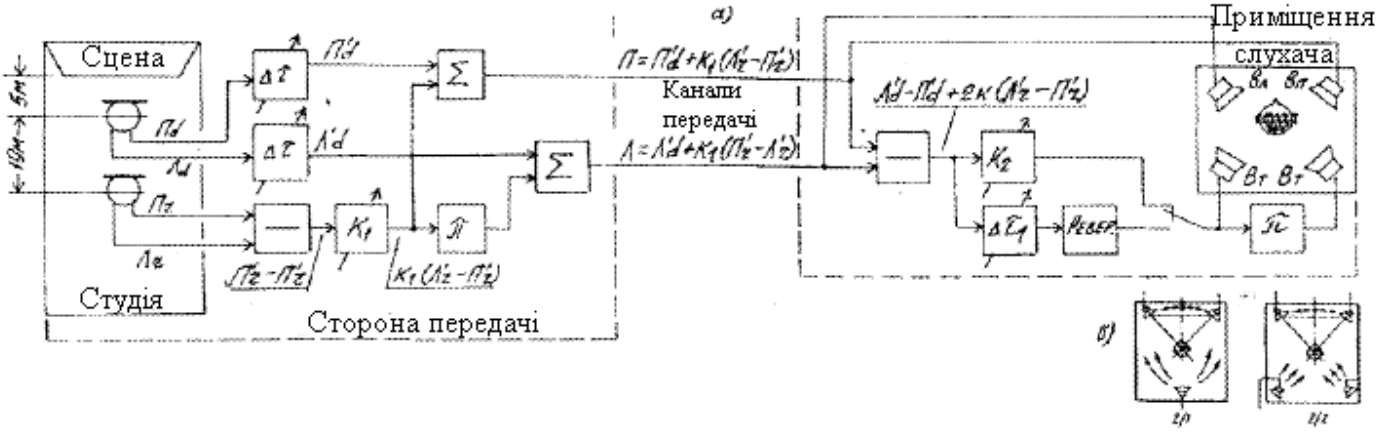


Рис.5.6. Стереоамбіфонічна система звукопередачі

1.4 Системи псевдо-або квазістереофонії

Дані системи позначаються як (2-2-4), з чого випливає, що вихідний сигнал формується тільки двома рознесеними мікрофонами, передається по двох каналах, а звуковідтворення -чотирьохканальне. Вони є виродженими і використовуються для відтворення *звичайних двохканальних стереопрограм* лише з деяким виграшем в об'ємності звучання, причому виграш не дає виграшу збільшенням вартості відтворюючої апаратури (чотири акустичних системи).

У сучасних системах двоканальної стереофонії знаходять застосування пристрої, які називаються синтезаторами просторового звучання. З їх допомогою вирішуються два завдання - збільшення протяжності стереопари і створення у слухача відчуття більшої просторовості, об'ємності звучання, ефекту «звукового оточення».

Різновиди стереопанорам для даного випадку представлені на рис.5.7,б (у порівнянні зі звичайною стереофонією - рис. 5.7, а).

Гучномовці розміщуються в колі з центром - місце положення слухача.

2. Сучасні системи просторового звучання

До багатоканальних звукових систем успіх прийшов тільки тоді, коли звукорежисери усвідомили, що мікрофони для запису музичних програм слід розміщувати тільки на сцені, а мікрофони, призначені для надання об'ємності звучання - в самому кінці залу, позаду слухачів. Ці тилові мікрофони повинні

сприймати тільки відображення основних звукових хвиль, що виходять з боку сцени, тобто продукти реверберації. У цьому випадку вони сприяють відтворенню реальної звукової панорами, яка існувала на концерті.

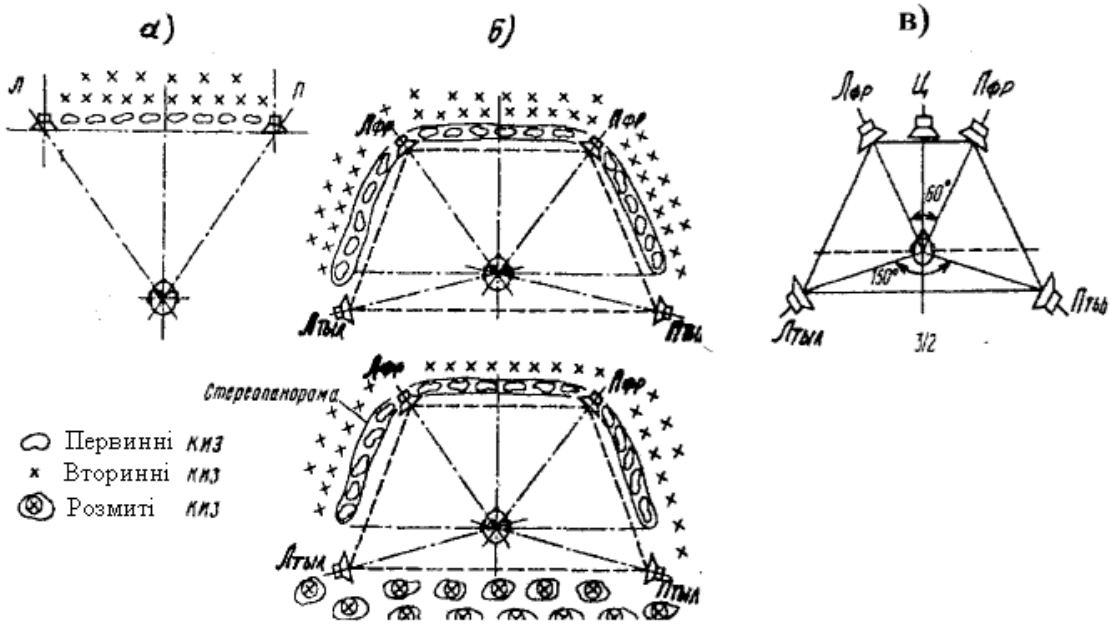


Рис. 5.7 Різновид стереопанорам двоканальної стереофонії

Той же принцип повинен дотримуватися і в кіно, якщо, звичайно, сюжет фільму на передбачає іншої звукової картини, розрахованої на «струс» нервової системи глядача гучними звуками, що лунають у нього за спиною або збоку. Основна маса звуків повинна виходити все-таки з боку екрану, тобто звідти, куди спрямований погляд глядача.

Правильне розуміння просторового звучання з'явилося саме в кіно, а не в звукозаписі.

У 1976 році в лабораторії Долбі після декількох років експериментальних досліджень була створена **матрична чотирьохканальна система**, яка передбачає три фронтальних звукових канали і один канал «оточення», який хоча й був монофонічним, але відтворювався двома тиловими гучномовцями, розміщеними по кутах біля задньої стіни приміщення для прослуховування. Система отримала назву «Dolby-stereo», рис.5.8,а. У порівнянні з рис. 5.7,б перед слухачем встановлюється ще один гучномовець - центральний (Ц). Тут розміщення КІЗ - на замкненій лінії, що проходить через всі гучномовці, що оточують слухача (-чів) на рівній відстані до нього.

В основу системи покладено варіант квадрафонічної матриці фірми Sansui, перероблений під схему розташування акустичної системи, прийняту в кінематографі. Також як і в квадрафонії, чотири незалежних звукових сигнали піддавалися матричному перетворенню на два.

Пізніше система одержала назву Dolby Surround (рис.5.8,б,в, рис.5.9), коли стала використовуватися для запису звукового супроводу на лазерних відеодисках. Слово «Surround» буквально означає «навколишній», «обступають»,

підкреслюючи об'ємність, просторовість звукової панорами. До складу звуковідтворюваного обладнання входять спеціальні звукові процесори, які вирішують завдання належної підготовки сигналів для гучномовців.

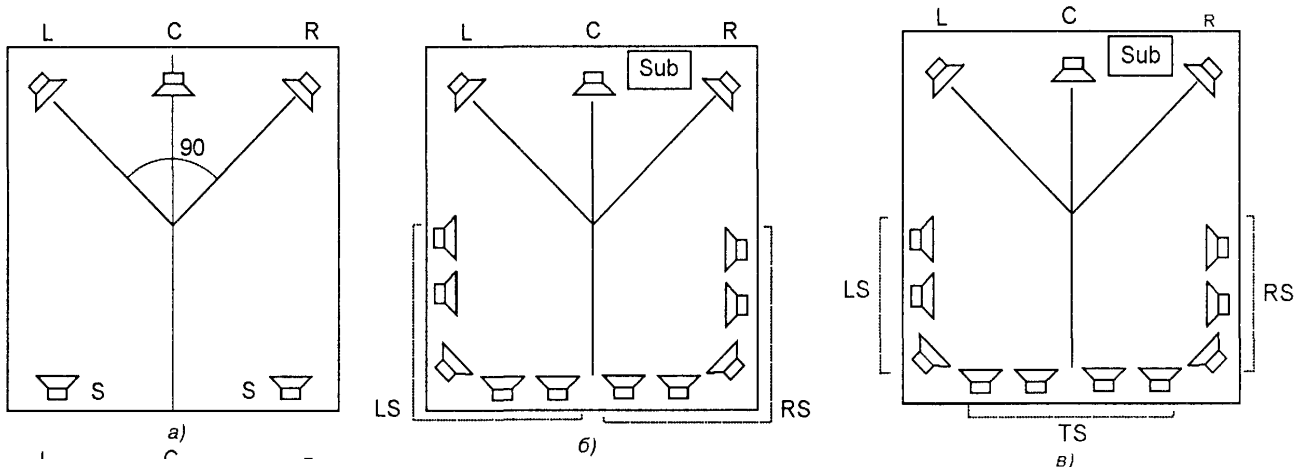


Рис.5.8. Расположение громкоговорителей в системах Dolby: *а* – Dolby Stereo, формат «3/1»; *б* – Dolby Surround, Dolby Pro Logic (формат «3/2») и Dolby Digital (5.1); *в* – Dolby Surround EX, формат «6.1»

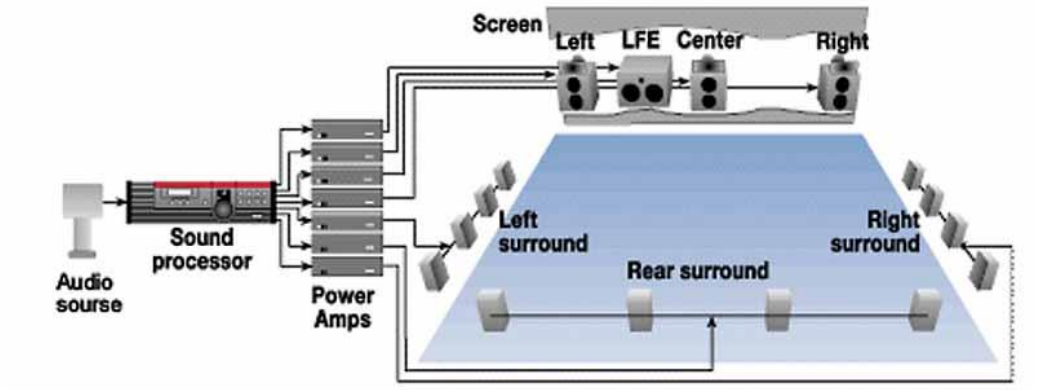


Рис. 5.9. Система Dolby Digital Surround EX 6.1

У комплект зазвичай включається гучномовець, що забезпечує відтворення наднизьких частот (***Subwoofer***) від 20 ... 40 до 80 ... 125 Гц (з метою отримання мінімальних спотворень на низьких частотах).

Нижня межа смуги частот, відтворених фронтальними гучномовцями, в даному випадку підвищується, що сприятливо позначається на якості звучання.

Системи відтворення «Dolby Pro logic» з трьома фронтальними гучномовцями Ц та тиловими гучномовцями« оточення »(Surround) двох форматів відтворення показані на рис. 5.10.

Збільшення кількості каналів передачі вимагає розробки нових комплексів апаратури студійних трактів радіобудинків і телецентрів, студій звукозапису. Ця задача вже вирішена, виробництво багатоканальних фонограм є звичайним явищем. Завдання розробки принципово нового передавального обладнання, включаючи обладнання розподілу програм, ще вимагає свого рішення. Поки залишається і завдання створення пристроїв індивідуального користування

(магнітофонів, електрофонів, радіоприймачів, тюнерів і звуковідтворювальних комплексів), особливо для систем мовлення мультимедіа і гіпермедіа.

Поки ж проміжним варіантом між старими стереосистемами і системами мовлення майбутнього виступають матричні стереофонічні системи з панорамним кодуванням сигналів джерел, що дозволяють суттєво підвищити якість звучання у порівнянні зі звичайною стереофонією, але при цьому не вимагають серйозної реорганізації розподільної мережі та мережі радіомовлення. Перехід до новітніх систем виправдовується лише в тих випадках, коли всі інші можливості (які не потребують таких радикальних змін) вже повністю вичерпані.

а) формат «3 / 2» б) формат «3 / 4»

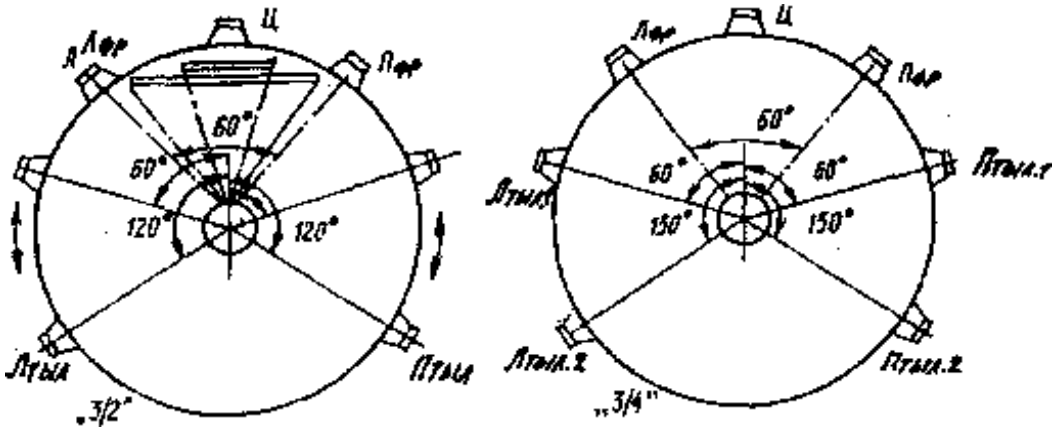


Рис. 5.10. Системи відтворення Dolby Pro Logic з форматами «3/2» і «3/4»

Примітка. Додамо, що реальні риси знайшла давно існуюча ідея домашнього кінотеатру, яка разом з високоякісним телевізійним приймачем, припускала і наявність системи високоякісного звучання, здатного занурити глядача, який сидить у м'якому кріслі у себе в квартирі в події, що розгортаються на екрані. При відтворенні музичної програми без зображення слухач не бачить дійсного розташування музикантів і вокалістів, і помилка в напрямку одного з них не має особливого значення. Зовсім інакше - в кіно. Положення джерела звуку на екрані і в напрямку на нього, що формується звуковим супроводом фільму, повинні точно збігатися. Переміщенню розмовляючого актора має відповідати супроводжуюче з ним переміщення, уявного джерела звуку в відтворюваній при цьому фонограмі. Інакше це викличе у глядача здивування.

Першою на цьому шляху знову опинилася лабораторія Р. Долбі, яка розробила в 80-х роках систему з п'ятьма незалежними широкосмуговими цифровими каналами звукового супроводу (фронтальні лівий / центральний / правий і тилові лівий/правий). Крім того, передбачався один низькочастотний канал ефектів для передачі частот 25...120 Гц (канал Low Frequency Effects - LFE). Система отримала найменування Dolby Digital. Всі шість звукових сигналів перетворяться в цифрову форму і кодуються по спеціально розробленому алгоритму AC-3 (Audio Coding 3) в єдиний цифровий потік даних. Через відмінності амплітудно-частотних характеристик п'яти основних каналів і каналу

LFE системи, подібні Dolby Digital, прийнято позначати двома цифрами з крапкою - (5.1).

У 1993 році фірма DTS (Digital Theatre Systems) продемонструвала розроблену нею систему просторового звучання, в якій звуковий супровід був записаний на дисках CD-ROM, а на кіноплівку наносився тільки часовий код. Під час демонстрації фільму за допомогою цього коду здійснювалася синхронізація зображення і відповідного йому звукового супроводу.

У тому ж 1993 році фірма Sony представила свою версію просторового звучання SDDS (Sony Dinamic Digital Systems) з вісьмома каналами звукового супроводу (формат 7.1), п'ять з яких - фронтальні, дві - тилові і один низькочастотний канал ефектів. У системі використовується метод кодування ATRAC (Adaptive Transform Acoustic Coding), який раніше застосовувався для запису звуку на міні дискових рекордерах. На кінострічці звуковий супровід записувався у вигляді двох однакових цифрових звукових доріжок, розташованих по краях стрічки (між перфораційними отворами). Стиснення інформації багатоканальних звукових сигналів у форматах 5.1 і 7.1 здійснюється відповідно до стандартів MPEG-2 і 4.

Перераховані системи просторового звучання стандартизовані і використовуються (крім кіно) в телебаченні високої чіткості (ТВЧ), супутниковому мовленні, для запису звукового супроводу відеофільмів на дисках DVD і іноді - для запису високоякісних музичних програм на дисках SCAD фірмою Sony.

У системах домашнього кінотеатру і кінематографі такі якості просторового сприйняття звуку як глибина, повнота і ясність звучання неможливі без точної локалізації джерел звуку.

З появою багатоканальних систем запису / відтворення стало можливим робити запис звукових програм в невеликих студіях, а реверберaційні процес (притаманний великим залаь) синтезувати штучно. Роль звукорежисера стає ще більш важливою. Крім того, з'явилися необмежені можливості для створення звукових стереоефектів в кіно, з якими також можна експериментувати, не виходячи зі студії. Вже проводяться експерименти з числом каналів до десяти і більше.

Нижче з урахуванням згаданих вище «досягнень» викладаються деякі відомості про стереофонію в кінематографі.

3. Стереофонія в кінематографі

Просторове звучання в кінематографі з'явилося значно раніше, ніж у побутовому звукозапису. У 1940 році Х. Флетчер з лабораторії Белла і знаменитий в ті часи диригент Л. Стоковський продемонстрували в Карнег-Хол створену ними новинку - фільм з трьохканальним звуковим супроводом. Звукові доріжки були записані оптичним способом на краях кінострічки, яка пересувалася з такою швидкістю, що забезпечувала частотний діапазон звукового супроводу від 30 до

15000 Гц (для того часу це був надзвичайно широкий діапазон частот). На краю стрічки поруч із звуковими доріжками була передбачена ще одна, четверта доріжка, сигнал з якої *використовувався для управління посиленням у всіх трьох звукових каналах*.

Основне призначення четвертої доріжки полягало в тому, щоб зменшити чутність шумів під час відтворення запису. Коли підсумовуються ідентичні канали, записані на трьох доріжках, то рівень гучності зростає втричі, а шуми (через відсутність кореляції між шумовими складовими цих записів) трансформуються в менш помітний для слуху «білий» шум. Завдяки цьому вдалося отримати динамічний діапазон звукового супроводу до 120 дБ !

Крім того, при трьохдоріжковому запису з'явилася можливість розділення музики, мови і спецефектів шляхом запису їх на окремі доріжки, що і дозволяє кваліфікувати подібне звучання як багатоканальне.

Однак, нереальною на перший погляд подією того ж року в світі звукового кінематографа стало створення У. Діснеєм (за участю Л. Стоковського) повнометражного кольорового мультиплікаційного фільму «Фантазія».

Для запису звукового супроводу до цього фільму використовувалася система, що отримала назву «Fantasound». У ній використовувалися чотири оптичних доріжки, розташовані на краях стрічки і синхронізовані з кінопроектором. Три з них були звуковими, а на четверту записувався керуючий сигнал. Керуючий сигнал містив три пілот-тона, кожний з яких керував величиною посилення у відповідному йому звуковому каналі. Сигнал кожного з трьох звукових каналів проходив через попередній підсилювач, величина посилення якого керувалася напругою, а потім надходила на вихідний підсилювач потужності, рис. 5.11.

Змінюючи спектр (комбінації пілот-тон) керуючого сигнала під час запису програми, можна автоматично змінювати під час відтворення посилення в кожному з трьох звукових каналів, отже, переміщувати уявні джерела звуку від одно гучномовця (групи гучномовців) до іншого (інших).

Набір для озвучування фільму включав десять акустичних систем: фронтальні лівий / центральний / правий, фронтальні кутів лівий / правий, два бічних гучномовця, два задніх і один верхній.

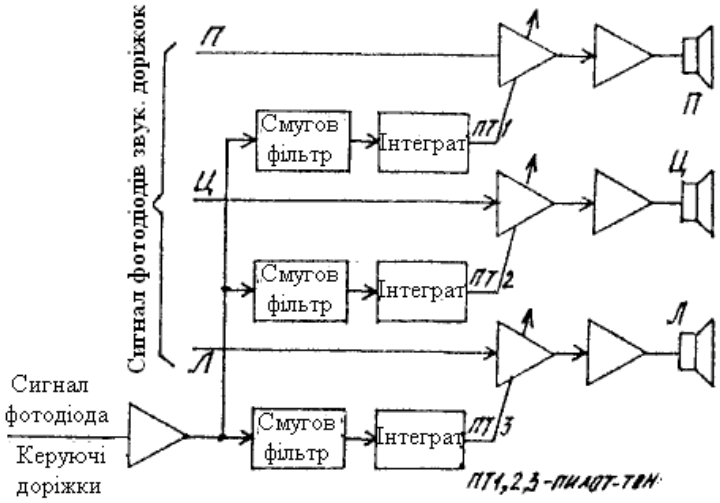


Рис.5.11. Схема відтворення звуку в системі «Fantasound»

Бічні і задній гучномовці використовувалися тільки для відтворення одного сегмента «AVE MARIA», за рахунок чого засновники фільму домагалися максимального емоційного напруження глядачів в потрібний момент.

Озвучування фільму вимагало від звукорежисера до звукоінженерів та їх асистентів воістину фантастичних зусиль і оскільки всі операції здійснювалися вручну величезною кількістю органів управління всієї маси використовуваного обладнання.

Прем'єра фільму мала шалений успіх. Під час подальших «гастролей» система «Fantasound» всякий раз підлаштовувалась під місцеві умови.

У 1956 році з'явився варіант фільму в системі Superscore чотирьох доріжковим звуковим супроводом, записаним на магнітному шарі, нанесеним безпосередньо на краях кінострічки.

У 50-і роки в кіноіндустрії для озвучування фільмів застосовувався звуковий супровід і до семи каналів. Так, формат плівки Todd-AO (70 мм) передбачав шість каналів, рис. 5.12.

У 1982 році фонограма фільму була реалізована в цифровому форматі з частотою дискретизації 50 кГц за допомогою чотирьох доріжкового магнітофона Soundstream. А коли з'явився DVD та Surround-формати, то «Фантазія» з легкістю перевелась на новий носій, а в кінопрокаті стала демонструватися зі звуковим супроводом у форматі 7.1 (7 основних акустичних системи і гучномовець низьких частот від 20 ... 40 до 80 ... 125 Гц - Subwoofer).

П'ять акустичних систем, призначених для відтворення п'яти основних каналів, розміщувалися перед глядачем вздовж екрану. Шостий канал, який виконував роль каналу «оточення», відтворювався через кілька акустичних систем, розташованих по краях залу для глядачів і біля його задньої стіни.

Згадане рішення надалі стало основою для створення форматів звукового оточення (Surround-форматів).

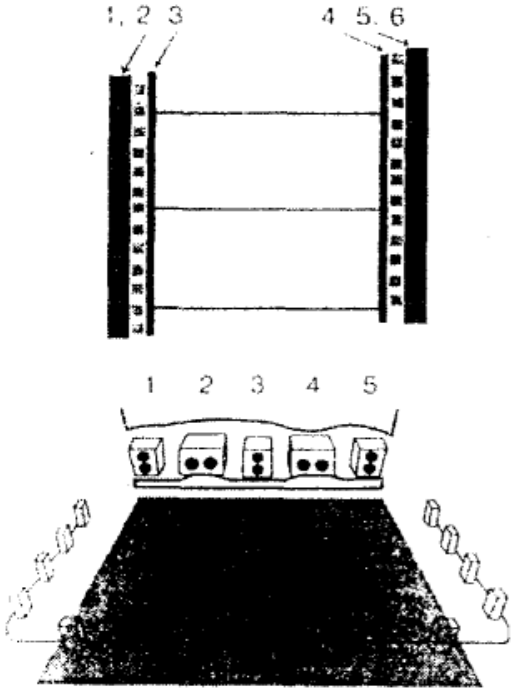


Рис. 5.12. Шестиканальна система озвучування фільмів і розташування смужок магнітної стрічки на краях кіноплівки.

4. Універсальний формат формування, передачі та відтворення звукових сигналів. Стандарт ISO / TES 11172-3

Усе різноманіття систем звукопередачі передбачено в документі 9/63E 1SO/IES 11172-3, в якому стандартизується метод MUSICAM (MPEG-1). *Важливо відзначити, що документ включає різноманіття варіантів, використовує однаковий метод кодування для кожної з компонент звукового сигналу на передавальній стороні і тому може бути введений поетапно, шляхом доповнення і розвитку вже існуючих систем звукопередачі.* Він універсальний і призначений для використання в радіомовленні, телебаченні, кінематографі, у домашніх аудіо-відеокомплексах.

Коротко (повний обсяг документа становить більше сотні сторінок) сенс формату полягає в наступному.

Формат передбачає формування на передавальній стороні п'яти компонент звукового сигналу, рис. 5.13.

Інформацію про ліві фронтальні частини звукового поля студії несе компонента L, про праві фронтальні - компонента R, про фронтальні частини - компонента C.

Ліва ефектна тилова компонента LS і права ефектна тилова RS компоненти несуть інформацію про реверберуючі звуки, відповідно в лівій і правій тилових частинах звукового поля студії.

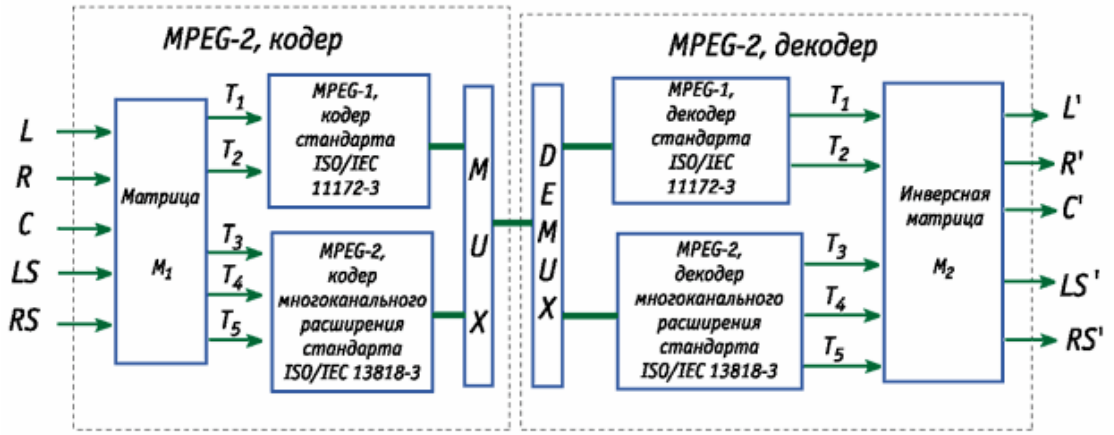


Рис. 5.13. Універсальний формат формування, передачі та відтворення звукових сигналів

На пару L і R вимоги сумісності з існуючими форматами не поширюється. За допомогою матриці *1* з цієї сукупності компонент формуються лівий і правий базисні сигнали стереопари, які утворюють спільний монофонічний сигнал Л + П.

Всього для передачі по трактах розподілу програм за допомогою матриці *1* формується п'ять сигналів для відтворення формату «3 / 2» за правилом:

$$T_1 = \mathbf{L} + 0{,}7071\ \mathbf{C} + 0{,}7071\ \mathbf{LS};$$
$$T_2 = \mathbf{R} + 0{,}7071\ \mathbf{C} + 0{,}7071\ \mathbf{RS};$$
$$T_3 = 0{,}7071\ \mathbf{C};$$
$$T_4 = 0{,}7071\ \mathbf{LS} + 0{,}7071\ \mathbf{RS};$$
$$T_5 = 0{,}7071\ \mathbf{LS} - 0{,}7071\ \mathbf{RS}.$$

Додавання. *Цифрова передача* перерахованих компонент виконується у форматі MUSICAM у відповідності з європейським стандартом ISO / IEC 13818-3 і 11172-3. При цифровій передачі компоненти T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 об'єднуються в MUSICAM -кодері *в два окремих цифрових потоки*, один з яких (основний) являє собою базисний сигнал стереопари T_1/T_2 звичайної стереофонії, а другий призначений для передачі додаткових фронтальної T_3 і просторових ефектних компонент T_4 та T_5 (цифровий потік додаткових сигналів $T_3/T_4/T_5$). До цієї групи додаються сигнали управління процесом декодування і сигнали ідентифікації формату передачі та відтворення.

Процедура перетворення сигналів на приймальній стороні відображена на малюнку. Відновлені компоненти звуку підводяться до відповідних гучномовців системи звуковідтворення.

У третій частині стандарту ISO/IES 11172-3 (MPEG-2 audio) передбачено кілька ступенів (рівнів, шарів) компресії цифрових аудіоданих. При цьому декодери вищого шару можуть декодувати сигнали, піддані меншій компресії на стороні передачі. Кожному з трьох ступенів компресії відповідає своя рекомендована область застосування.

«Layer 1» рекомендується для застосування в професійній сфері і в системах звукозапису з достатньою ємністю пам'яті, із записом і перезаписом зі студійною якістю, дуже високою якістю звуку. Цей рівень характеризується малою

складністю і не занадто високим стисненням аудіо даних. Основні параметри: швидкість цифрового потоку при передачі монофонічного каналу становить 192 кбіт/с при смузі частот звукового сигналу 15 кГц, коефіцієнт компресії складає 768/192 = 4, затримка сигналу на процес обробки становить 20 мс.

«Layer 2» орієнтований на прості професійні випадки застосування, високоякісне радіомовлення. Характеризується середнім ступенем компресії аудіо даних при їх цифровій обробці і середньою складністю. Основні параметри: швидкість цифрового потоку при передачі монофонічного каналу становить 128 кбіт/с при смузі частот звукового сигналу 15 кГц, коефіцієнт компресії складає 768/128 = 6, затримка сигналу на процес обробки складає 40 ... 50 мс.

«Layer 3» рекомендується для передачі мови по вузькосмуговим, каналам в мережах ISDN у професійній галузі (в радіомовлення і в системах звукозапису з малою ємністю пам'яті і середньою якістю) і відрізняється високою складністю. Основні параметри: швидкість цифрового потоку при передачі моно фонічного каналу становить 64 кбіт / с при смузі частот звукового сигналу 15 кГц, коефіцієнт компресії складає 768/64 = 12, час затримки сигналу в процесі обробки перевищує 50 мс.

Відзначимо, що і в новітніх компандерних аналогових системах («Dolby-A,-B,-C»; «Panda» тощо) враховуються психофізичні властивості слуху, а також явище маскування, щоправда, з меншими можливостями.

Суть скорочення обсягу цифрової інформації (що застосовується, зокрема, при MUSICAM-методі) зводиться до відбору за часом і спектром частку сигналу таким чином, щоб вище порогу чутності були відсутні шуми, перешкоди і спотворення. Або інакше - після обробки сигналу в ньому мають бути відсутні ті частотні компоненти й часові відрізки сигналу, які при слуховому сприйнятті маскуються. Тобто частотні області без сигналу повинні бути звільнені від передаваємих біт (відображають лише шуми і перешкоди).

Величина кроку квантування змінюється так, що шум квантування залишається нечутним, тобто маскується сигналом. Співвідношення рівня корисного сигналу і мінімального відносного порогу чутності визначає в цьому випадку величину необхідного кроку квантування.

Щоб реалізувати цю ідею, загальна смуга частот звукового мовного сигналу розділяється фільтрами на вузькосмугові складові. Ці смужки частот близькі до критичних смуг слуху, де маскування найбільш відчутне (що ілюструється «сплесками» порога чутності, які й визначають маскування мовного сигналу шумами), оскільки обробка звукового сигналу в слуховій системі людини виконується саме в цих смугах.

Можливі різні психоакустичні моделі, які можуть бути покладені в основу редукції (стиснення) аудіо даних при їх обробці з метою скорочення надлишковості передаваємих (або консервуючих) цифрових звукових сигналів. Так, стандарті MPEG (Moving Pictures Experts Group) містяться дві такі ідеї. Редукція аудіо даних в обох моделях різна. Однак для декодування сигналів можна використовувати один і той же декодер.

Примітка (MPEG-1). Протягом останніх років у світі сформувався новий стандарт **для спільної цифрової передачі сигналів зображення і звуку** в скомпресованому (стислому) вигляді, який отримав найменування MPEG-1-Standart ISO / IES 11172-3, і його подальший розвиток для систем з багатоканальним звуком MPEG-2 -Standart ISO / IES 13818-3 (1994 р).

Стандарт MPEG-1 вже реалізовано в системі цифрових компакт-касет (DCC), де для кодування звуку використовується «Layer 1». Його застосування передбачено у системах цифрового радіомовлення DAB (Digital Audio Broadcasting), де для кодування звукових сигналів використовується рівень «Layer 2». Сумарна швидкість цифрового потоку при передачі зображення та звуку в MPEG-1 становить 1,5 Мбіт/с (замість ≈ 6,5 МГц).

Стандарт MPEG передбачається реалізувати в телебаченні високої чіткості, а також для багатоканальної передачі звуку в звуковому мовленні, для запису й передачі сигналів по мережах ISDN.

Алгоритм кодування виконується в MPEG-кодері. Короткий попередній коментар до нього зводиться до наступного.

Блоком (гребінкою) фільтрів (з оптимізованим часовим вікном) вхідний сигнал поділяється на 32 частини («смужки»), у кожній з яких для спільної обробки використовуються 12 або 36 значень часових відліків, об'єднаних в групу. Смужки мають однакову ширину $f_д/64$.

Смугові сигнали дискретизуються з частотами, кратними 32 кГц. В «Layer 3» в групи об'єднуються 6 або 18 значень відліків (632 або 1832). Швидке перетворення Фур'є виконується для 512 («Layer 1» з роздільною здатністю $f_д/512$) або 1024 («Layer 2» з роздільною здатністю $f_д/1024$) значень відліків. В якості частот дискретизації аналогових сигналів передбачені стандартизовані 48 кГц, 44,1 кГц і 32 кГц.

Після того, як у кодері визначені рівні сигналу в окремих частотних смужках, визначається абсолютний поріг чутності і аналізується, чи йде мова про тональні (синусоподібних) або нетональні (шумові) частини сигналу. На основі психоакустичної моделі ідентифікуються частки (частини) сигналу, які значною мірою маскуються. Потім обчислюється значення SNR, при якому шум ще маскується корисним сигналом. У «Layer 1» і «Layer 2» ці розрахунки виконуються для кожної смужки, а в «Layer 3»-для груп смужок. У «Layer 1» і «Layer 2» для кодування у кожній смужці застосовується звичайна ІКМ з лінійним квантуванням (при цьому в «Layer 2» квантовані значення можуть бути об'єднані в групи).

Аудіо дані, дані управління й біти коректуючих кодів при форматуванні цифрових даних об'єднуються в загальний потік.

Питання для самоконтролю

1. Дайте характеристику повної квадрофонічної системи звукопередачі.
2. Дайте характеристику системи звуковідтворення зі звуковим оточенням.
3. Які досягнення стереофонії в кінематографі?

ДОДАТОК Д. РИСУНКИ ДО ЛЕКЦІЇ №5

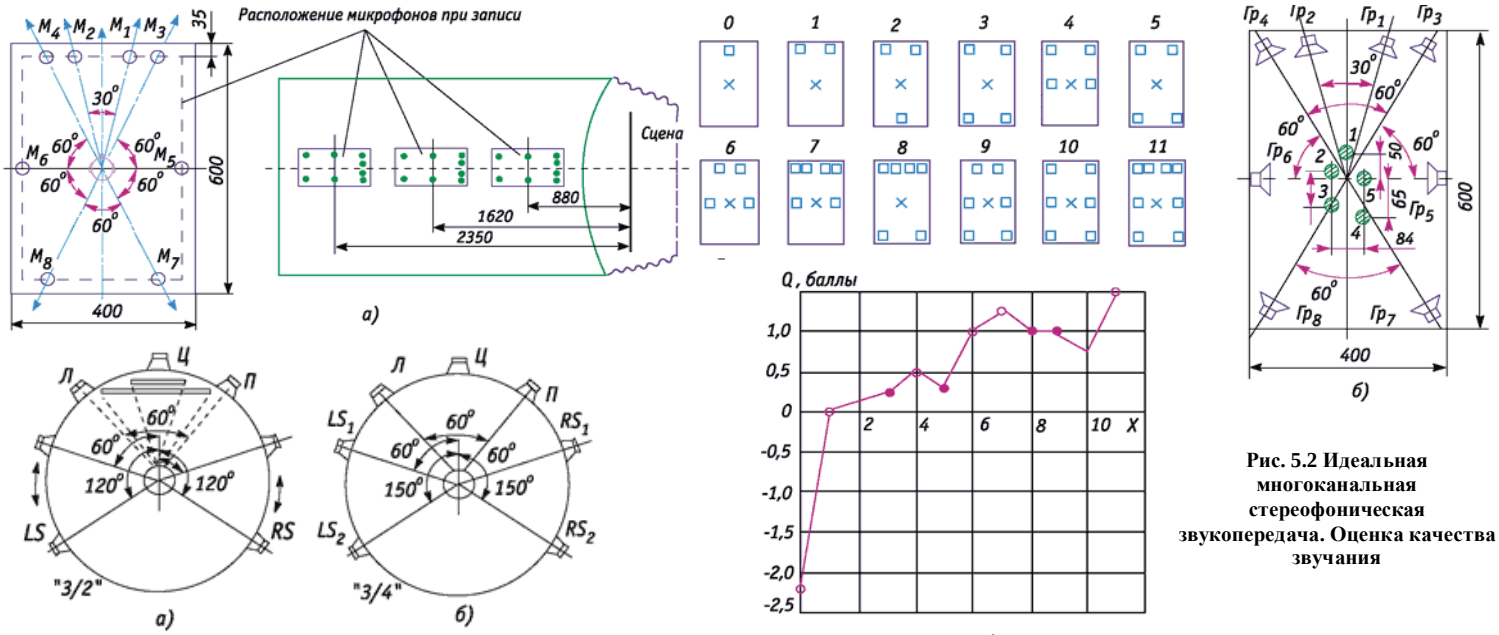


Рис. 5.1 Система звуковоспроизведения форматов «3/2» и «3/4»

Рис. 5.2 Идеальная многоканальная стереофоническая звукопередача. Оценка качества звучания

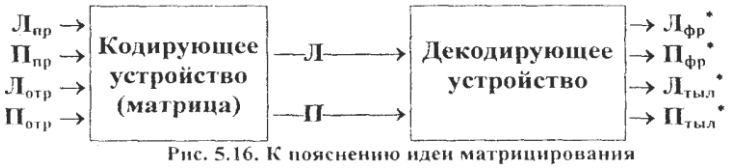


Рис. 5.16. К пояснению идеи матрицирования

$Л = a\,Л_{пр} + b\,П_{пр} + c\,Л_{отр} + d\,П_{отр}$ $\quad П = b\,Л_{пр} + a\,П_{пр} + d\,Л_{отр} + c\,П_{отр}$

$Л_{фр} = e\,Л + f\,П,\quad Л_{тыл} = f\,Л + e\,П,\quad П_{фр} = g\,Л + h\,П,\quad П_{тыл} = h\,Л +$

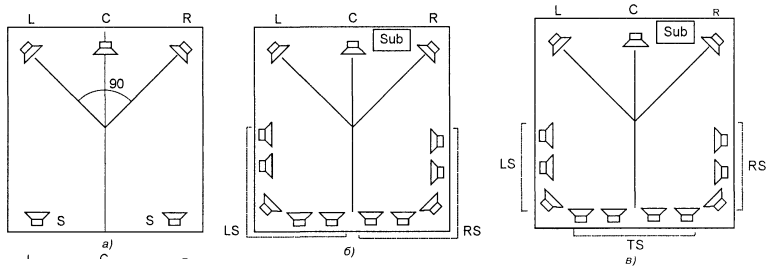


Рис.2.1. Расположение громкоговорителей в системах Dolby: *а* – Dolby Stereo, формат «3/1»; *б* — Dolby Surround, Dolby Pro Logic (формат «3/2») и Dolby Digital (5.1); *в* — Dolby Surround EX, формат «6.1»

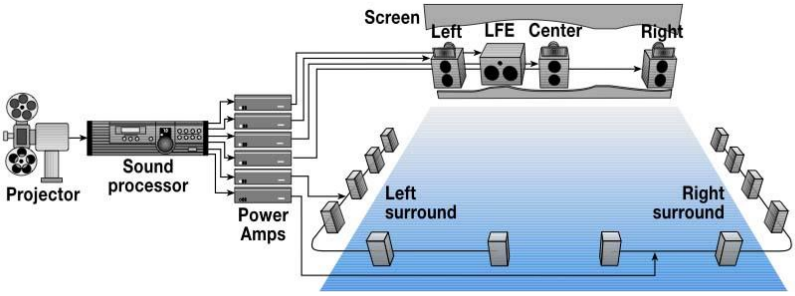


Рис.6. Расположение громкоговорителей в системе Dolby Surround и Dolby Digital (5.1)

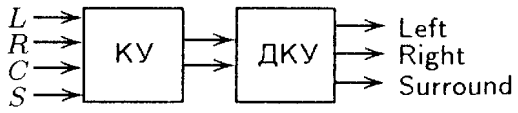


Рис. 2.2. Система Dolby Surround — упрощенная структурная схема

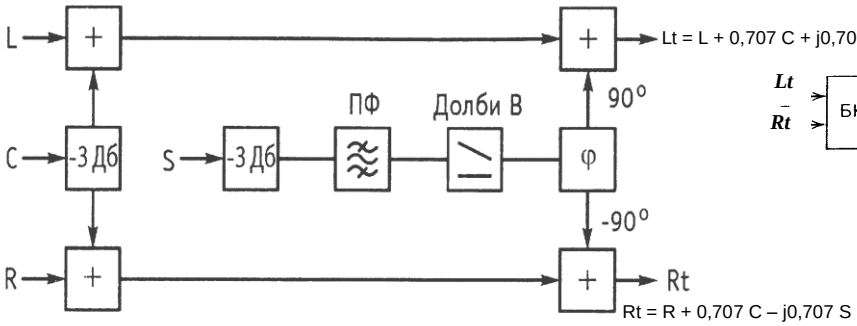


Рис. 6.19. Функциональная схема кодера Dolby Surround

6.20. Пассивный декодер Dolby Surround

Рис.1.41. Система Dolby Pro Logic

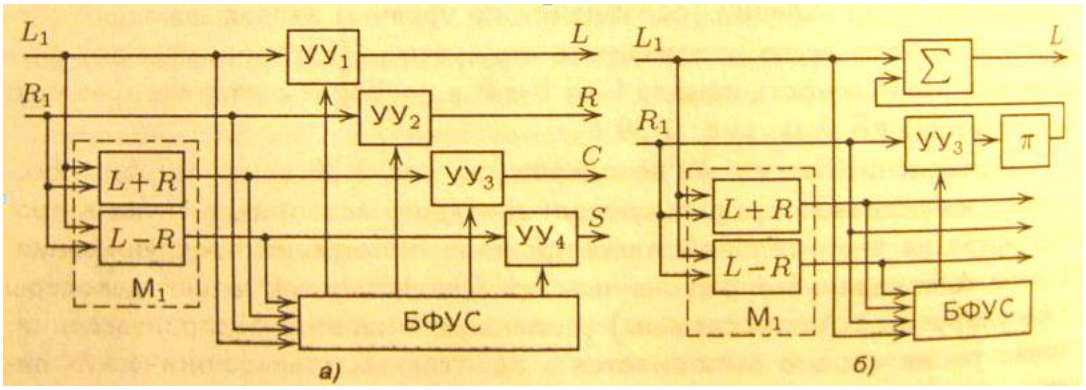
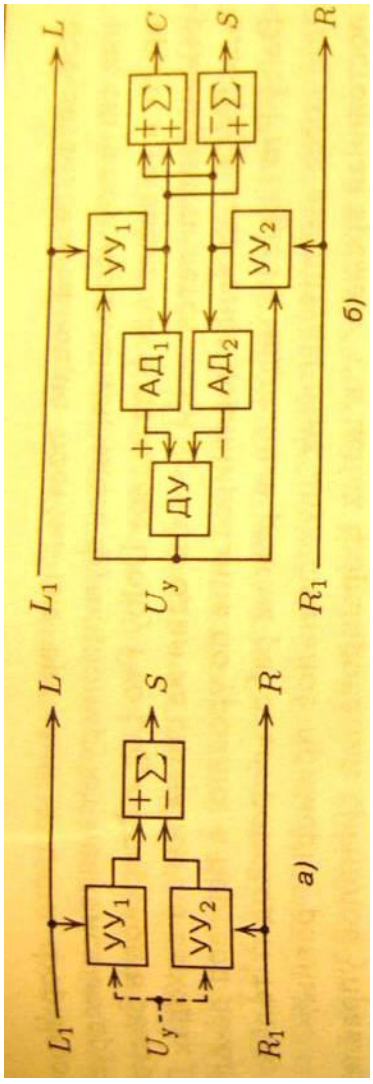


Рис. 1.39. Разделимость сигналов *L, R, C,S* в Dolby Surround а) объективно существующая; б) кажущаяся при слуховом восприятии

Рис. 1.39. К принципу формирования компенсирующих сигналов: а) концепция; б) возможная реализация в системе Dolby (Surround) Pro Logic



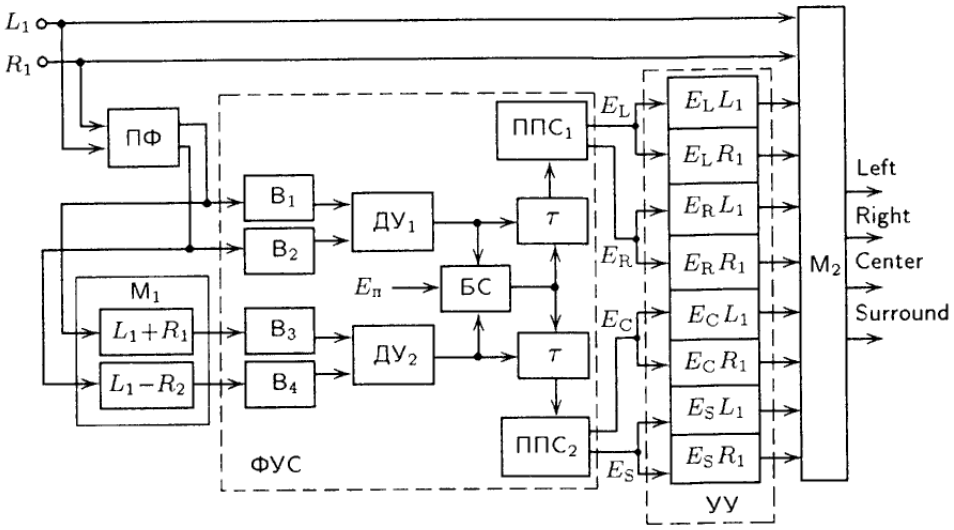


Рис. 9.38. Структурная схема активного декодера системы Dolby Pro Logic

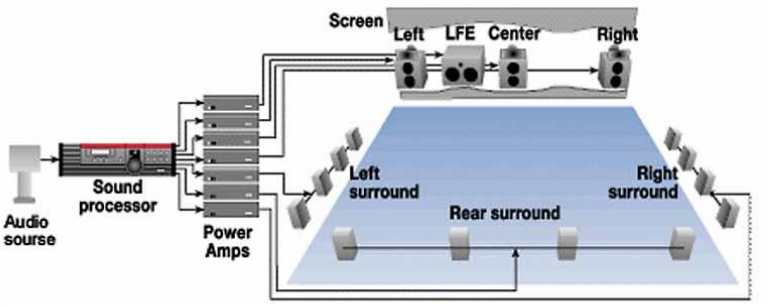


Рис. 1.45. Система Dolby Digital Surround EX 6.1

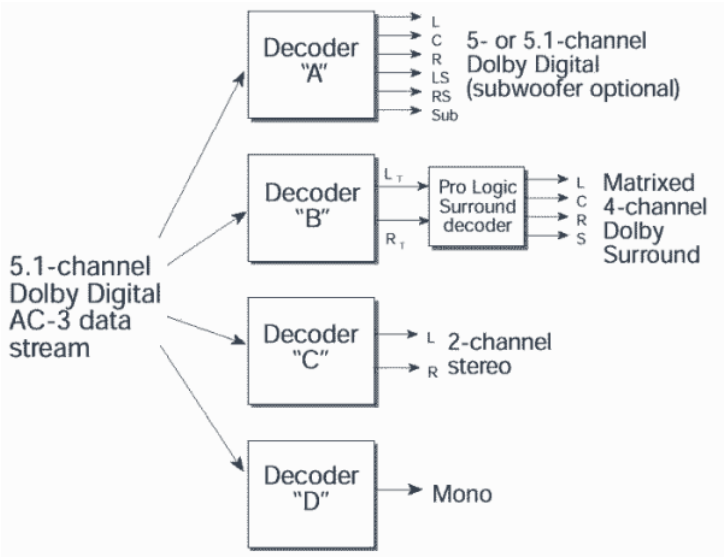


Рис. 6.26. Декодеры Dolby Digital AC-3

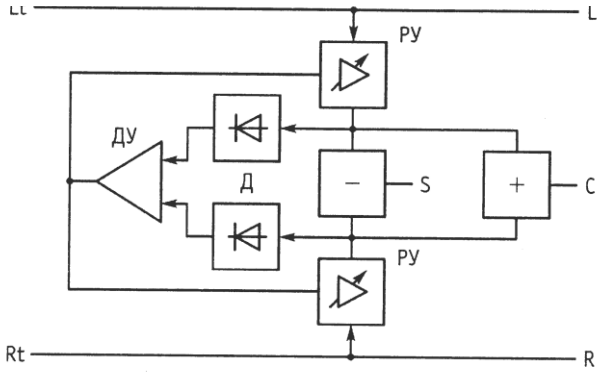
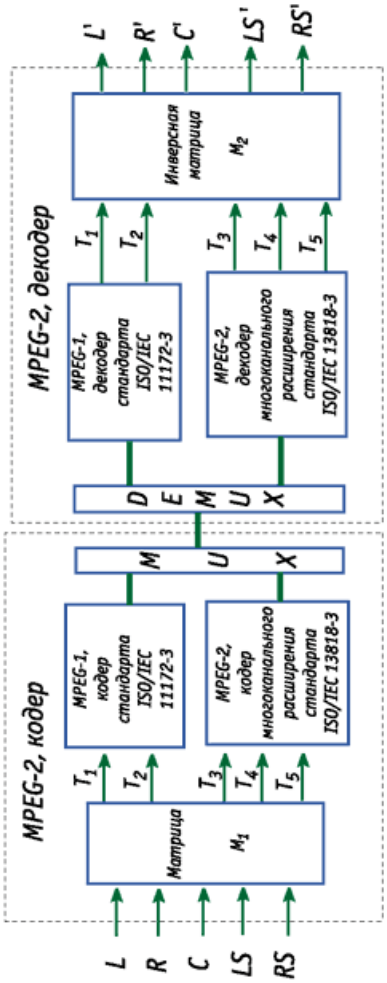


Рис. 6.25. Функциональная схема декодера Dolby Surround Pro Logic II



ЛЕКЦІЯ №6 ЯКІСТЬ КАНАЛІВ І ТРАКТІВ ЗВУКОВОГО МОВЛЕННЯ

ЛІТЕРАТУРА:

- Брагин А.С. Технологии вещательных служб. Часть 1. Технологии звукового радиовещания. –К.: НТУУ «КПИ», 2006.
- Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов./Под ред. Ю. А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком., Радио и связь, 2007. – 872 с.

РОЗДАТНИЙ МАТЕРІАЛ: див. ДОДАТОК Е

1. Оцінка каналів і трактів звукового мовлення. Класи якості обладнання

1.1 Оцінка каналів і трактів звукового мовлення

Якість каналів звукового мовлення оцінюється тим, наскільки відтворюване на приймальній стороні звучання близьке до натурального. Будь-яка відмінність відтвореного звучання від сформованого звукорежисером сприймається як *спотворення*.

Спотворенням називається невідповідність відтвореного звукового сигналу у слухача сигналу джерела звуку, тобто сигналу, який відтворюється гучномовцем (на виході звукового каналу), та сигналу біля мікрофона (на вході каналу звукового мовлення).

Для оцінки спотворень використовуються суб'єктивні і об’єктивні методи. ***Об'єктивна оцінка спотворень*** проводиться за допомогою вимірювальних приладів. При ***суб'єктивному методі*** спотворення визначаються експертами, які порівнюють спотворені уривки програм з неспотвореними. Допустима величина спотворень встановлюється в залежності від помітності на слух даного виду спотворень. При методі суб'єктивної оцінки спотворень проводяться ***суб'єктивної-статистичні експертизи***.

Для практичного забезпечення якості передачі мовних програм по каналах важливо знайти відповідність між об'єктивною та суб'єктивною оцінками спотворень.

Наприклад, визначити частотний діапазон джерела звуку по спектрограмі не завжди можливо через відсутність об’єктивних критеріїв значимості спектральних складових для слухового сприйняття. Вихід з подібної ситуації може бути знайдений зверненням до слухових експертиз. «Обрізаючи» спектральні складові звуку джерела знизу і зверху (спеціальними фільтрами із змінною частотою зрізу **Fзр**), можна визначити верхню та нижню межу спектра по «помітності» цього «обрізання» слухачами. Для визначеності, за ***граничне значення нижньої або верхньої частоти спектру*** приймають те, при якому 75% слухачів виявляють (помічають) зміну сприйняття.

На рис. 6.1 представлені експертні статистичні криві помітності обмеження смуги частот звукового тракту зверху і знизу для низки звукових програм.

Дослідження показали, що висококваліфіковані експерти помічають різницю у звучанні натурального і спотвореного сигналів не більш ніж у 15% випадків, якщо смуга звукових частот скорочується до 30...15000 Гц. Двостороннє скорочення в області верхніх і нижніх частот помічається на слух і сприймається експертами більш сприятливо, ніж одностороннє скорочення в області нижніх або верхніх частот.

а) сигнали мови (1 - розмовна мова; 2 - співоча мова).

Отже, хоча спектр сигналу звукового мовлення займає смугу частот від 20 Гц до 20 кГц, для передачі сигналів по каналах цю смугу зазвичай обмежують як зверху, так і знизу від 30 Гц до 15 кГц (навіть в каналах вищого класу) і ще вужче. Можливість звуження смуги частот мовного сигналу на передачу виправдовується тим, що на приймальній стороні (при перетворенні електричних коливань у звукові) смуги частот обмежуються «явочним порядком» звуковідтворювальною апаратурою (особливо найбільш масової - побутовою).

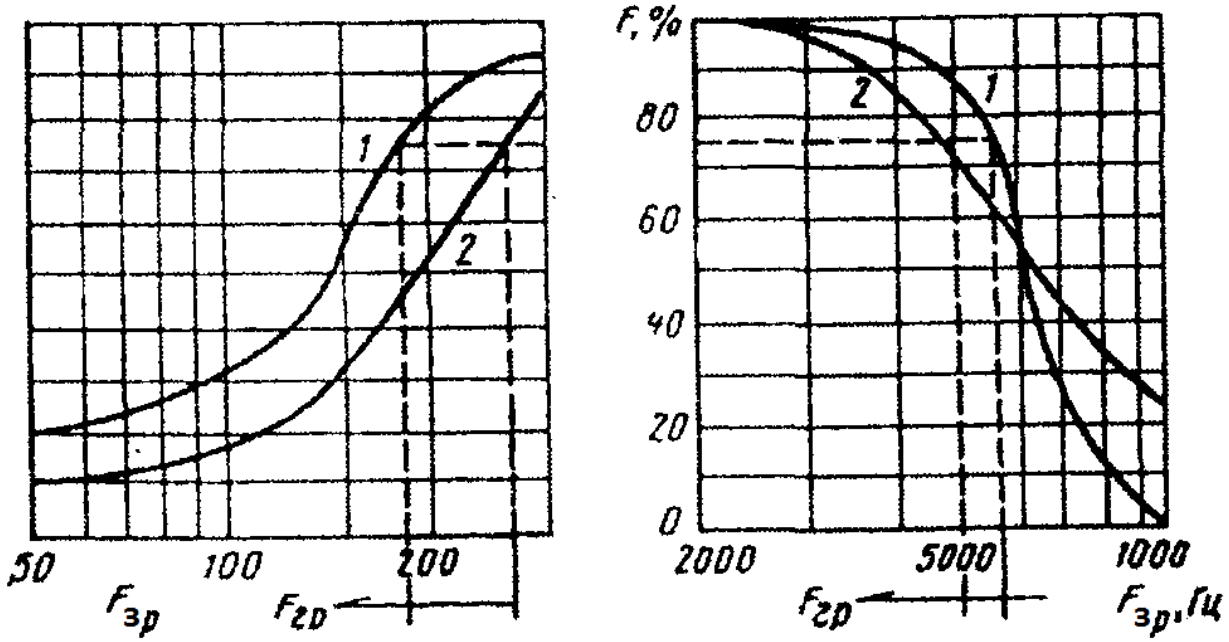


Рис. 6.1. Помітність обмеження частотного діапазону мовних сигналів (моно)

Мовні сигнали проходять від джерел мовних програм до слухачів (по трактах розподілу) "довгий" шлях. Технічні засоби згаданих трактів не повинні вносити недопустимим трансформацій спектра мовного сигналу.

Саме тому до технічних засобів каналів мовлення повинні бути сформульовані, а потім і реалізовані, технічні характеристики, відповідно до яких обладнання відносять до певних класів якості.

1.2 Класи якості обладнання

Допустима величина того чи іншого виду спотворень, що оцінюється на слух, використовується для встановлення норм на якісні показники каналів і окремих ланок. Для встановлення норм проводяться суб'єктивні експертизи з використанням різного роду звучань (мова, музика). Відповідно до результатів експертиз будуються криві, що показують зміну помітності того чи іншого виду спотворень в залежності від їх значень (наприклад, від обмеження ширини спектру сигналу). Орієнтовний вигляд таких кривих показано на рис. 6.2.

По осі абсцис відкладається величина досліджуваного спотворення звучання, а по осі ординат - кількість слухачів (експертів), які помітили це спотворення, у відсотках до загального числа слухачів. Перша крива побудована за результатами оцінок групи висококваліфікованих експертів (музиканти, звукорежисери) - 1-а група. При побудові другої кривої враховуються оцінки звичайних слухачів (2-а група).

З рис.6.2 випливає, що група експертів більш критично сприймає і оцінює викривлення, ніж група звичайних слухачів.

У радіомовленні прийняті наступні формулювання помітності спотворень:

абсолютно непомітно - спотворення (або завада, шум) відзначено менш ніж у **15%** загального числа свідчень експертів будь-якої з груп,

практично непомітно - **30%**,

невпевнено помітно - **50%**,

впевнено помітно - помітність спотворень відзначається в 75% свідчень, тобто більшість експертів помітять спотворення (або заваду).

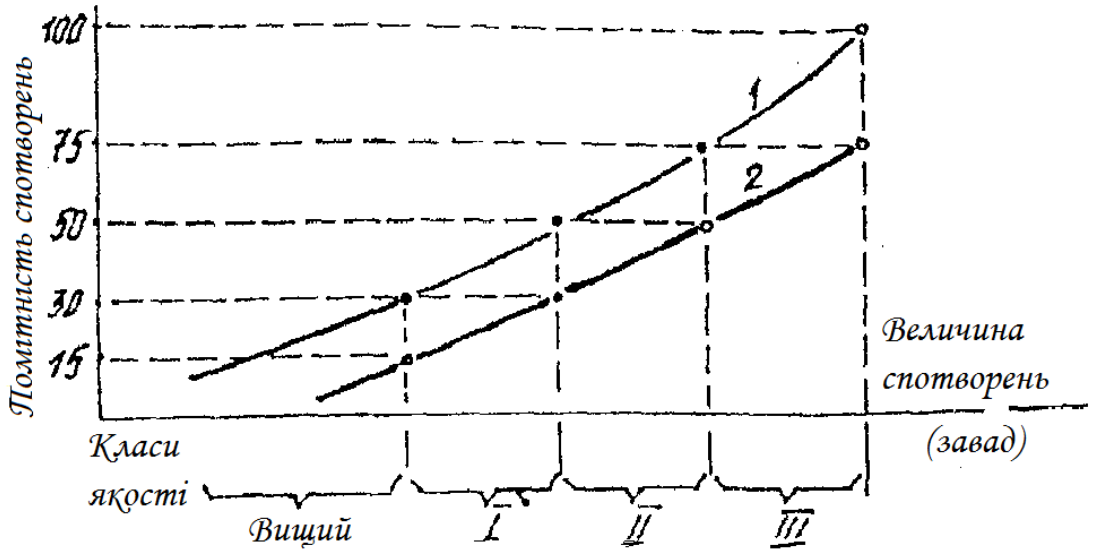


Рис.6.2. Принцип присвоєння обладнанню мовлення прийнятих класів якості звучання

Відповідно до ступеня помітності спотворень встановлені наступні 4 класи якості звучання:

вищий - відповідає звучанню, при якому спотворення зовсім непомітні експертам 2-ї групи і практично непомітні експертам 1-ї групи,

перший - викривлення практично непомітні слухачам 2-ї групи і невпевнено помітні слухачам 1-ї групи,

другий - викривлення невпевнено помітні слухачам 2-ї групи і впевнено помітні слухачам 1-ї групи,

третій (практично не ГОСТуємий) - викривлення впевнено помітні звичайним слухачам.

Клас якості встановлюється в залежності від технічної та економічної доцільності.

До вищого класу належить апаратура великих радіобудинків і комутаційно-розподільних апаратних, професійні приймачі радіосигналів з кутовою модуляцією (призначені для ретрансляції програм мовлення), радіопередавачі з кутовою модуляцією.

До першого класу якості відносяться радіомовні передавачі з амплітудною модуляцією, професійні радіомовні приймачі амплітудно-модульованих сигналів, міжміські канали мовлення, апаратура великих радіовузлів і станцій проводового мовлення, а також високоякісна апаратура звукозапису, музичні центри.

До другого класу якості мовлення відносяться трансляційні мережі невеликих міст, апаратура невеликих станцій проводового мовлення, побутові радіомовні приймачі та магнітофони. Обладнання перерахованих класів згаданим не вичерпується.

Параметри якості каналів і трактів звукового мовлення встановлюються національними стандартами, які зазвичай враховують Рекомендації міжнародних організацій, що регулярно переглядаються.

2. Спотворення мовних сигналів у ланках мовних трактів та їх нормування

На якість звучання впливають спотворення, викликані відхиленнями *амплітудно-частотних*, *фазо-частотних і амплітудних характеристик* від ідеальних, а також шуми і завади, які потрапляють в мовні канали в будь-якому місці їх протяжності.

На якість звучання стереофонічних програм додатково впливає порушення «симетрії» між каналами **Л** і **П**.

У каналах цифрового мовлення якість звучання виявляється залежною від спотворень, що вносяться аналого-цифровими перетворювачами (шуми квантування).

2.1. Частотні спотворення

Коефіцієнт передачі $К_{пер}$ будь-якої ланки тракту передачі електричних сигналів мовлення є комплексною величиною, яка визначається модулем коефіцієнта передачі і фазовим зсувом між вихідним і вхідним напругами згаданої ланки.

Залежність модуля коефіцієнта передачі від частоти називається ***амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ)*** ланки, а залежність фазового кута (різниці фаз між вихідною і вхідною напругами) - ***фазо-частотною характеристикою ланки (ФЧХ).***

Частотна характеристика (ЧХ) представляється у прямокутній системі координат з логарифмічним масштабом по частотній осі. *Ідеальною є характеристика, яка паралельна горизонтальній осі*. У цьому випадку ланка не вносить частотних спотворень. Кожна складова спектру сигналу передається з однаковим коефіцієнтом передачі, без порушень пропорцій між ними. Реалізувати таку характеристику на практиці неможливо. Тому в заданій смузі частот нормується нерівномірність частотної характеристики $\Delta К_{пер}$.

Зазвичай вона визначається в децибелах відносно значення на частоті F_0 (800 або 1000 Гц), що приймається за нуль дБ. Поле допусків для АЧХ задається в межах від нижньої Fн до верхньої Fв частот діапазону.

Величини Fн і $F_В$ для кожного класу обладнання і нерівномірність АЧХ всередині Fн ... Fв також нормується. Наприклад, у Рекомендаціях МСЕ-Р та МСЕ-Т розглядаються такі типи каналів звукового мовлення:

- ***канал зі смугою частот 0,04 ... 15 кГц***, рекомендований для **організації високоякісного монофонічного і стереофонічного мовлення**, з допустимими відхиленнями АЧХ (щодо коефіцієнта передачі на частоті 1000 Гц) у смузі частот

0,04 ... 0,125 кГц +0,5 ...- 2 дБ,
0,125 ... 10 кГц ± 0,5 дБ,
10 ... 14 кГц 0,5 ... -2дБ,
14 ... **15кГц** 0,5 ... -З дБ;

- ***канал зі смугою 0,05 ... 10 кГц***, рекомендований для монофонічного мовлення;

-вузькосмугові («репортажні») канали зі смугами частот 0,05...7 і 0,07...5кГц, рекомендовані для організацій тимчасових міжнародних або національних каналів для коментарів або репортажів (спортивних, наприклад), а також для організацій з'єднувальних ліній між радіобудинком і передавачами мовлення кіло-, гекто- і декаметрових хвиль, з відхиленнями АЧХ:

0,05 ... 0,1 кГц	+1 ...- ЗдБ,	**0,07** ... 0,2 кГц	+1 ...- ЗдБ,
0,1 ... 6,4 кГц	± 1 дБ,	0,2 ... 4кГц	± 1 дБ
6,4 ... **7кГц**	+1 ...- ЗдБ;	4 ... **5кГц**	+1 ...- ЗдБ.

Вітчизняними ГОСТами відхилення АЧХ нормовані в залежності від ширини смуги частот мовного сигналу:

0,04 ... 0,05 кГц +2 ...- 4,2 дБ,

0,05 ... 0,125 кГц ± 2 ... -3,8 ДБ,
0,125 ... 10кГц +2 дБ,
10 ... **15кГц** +2 ...- 3,8 дБ;

0,05 ... +0,1 кГц +2,4 ...- 5 дБ, **0,1** ... 0,15 кГц +2,5 ... -3,6 ДБ,
0,1 ... 0,2 кГц +2,4 ... -3,9 дБ, 0,15 ... 6 кГц +2,5 дБ,
0,2 ... 8,5 кГц +2,4 дБ, 6 ... **6,4 кГц** +2,5 ... -3,6 ДБ.
8,5 ... **10кГц** +2,4 ...- 5 дБ;

З наведених даних видно, що норми на параметри каналів згідно з ДСТУ 11515 з урахуванням тракту мовних радіопередавачів дещо відрізняються від норм міжнародних рекомендацій, а для стереофонічних передач поки що відсутні.

2.2. Фазові спотворення

У ланцюгах, що містять реактивні елементи, час розповсюдження синусоїдальних сигналів залежить від частоти, *внаслідок цього окремі гармоніки складного переданого сигналу затримуються (зсуваються) на різні відрізки часу, що призводить до спотворення форми сигналу, тобто фазових спотворень*. Для відсутності фазових спотворень необхідно, щоб груповий час уповільнення $\tau_з$ був постійним для кожної складової спектру звукового сигналу. Тоді сигнал не змінює своєї форми.

Особливо знижується якість передачі, коли часовий зсув наближається до *тривалості складу*. Збільшення часу уповільнення високочастотних складових сприймається як своєрідна зміна звучання.

Зазвичай фазові спотворення характеризуються різницею за часом пробігу по каналу сигналів середньої частоти і граничних частот діапазону. Рекомендації МСЕ-Р та МСЕ-Т нормують зміну групового часу уповільнення (відносно часу уповільнення на частоті 1 кГц) на частотах діапазону згаданих вище типів каналів так:

а) **0,04 кГц** 55 мс; 0,075 кГц 24 мс; 14кГц 8мс; **15кГц** 12мс;
б) **0,05 кГц** 80 мс; 0,1 кГц 20мс; 6,4 кГц 5 мс; **7 кГц 10 мс**;
в) **0,07 кГц** 60 мс; **5 кГц** 15 мс.

Для сигналів мовлення, які перетворюються в цифрову форму, виняткове значення має *постійність групового часу уповільнення* в тракті передачі цифрових сигналів.

Так як людське вухо є частотним аналізатором, то воно мало чутливе до фазових спотворень. Але при великих гучностях звуку фазові спотворення можуть сприйматися як зміна тембру. Але в національних ДСТУ вони поки що не нормуються.

2.3. Нелінійні спотворення

Нелінійні спотворення виникають через нелінійність амплітудної характеристики якої-небудь ланки тракту, що порушує пряму пропорційність між миттєвими значеннями вхідного і вихідного коливань. При проходженні сигналу через нелінійний ланцюг (ланку) спектр цього сигналу збагачується новими складовими, які й призводять до зниження якості вихідного сигналу.

З 1926 р. (коли вперше били виміряні нелінійні спотворення-НС) запропоновано понад 20 різних методів вимірювання. У мовленні нормування нелінійних спотворень здійснюється *методом одного тону*, рис. 6.3.

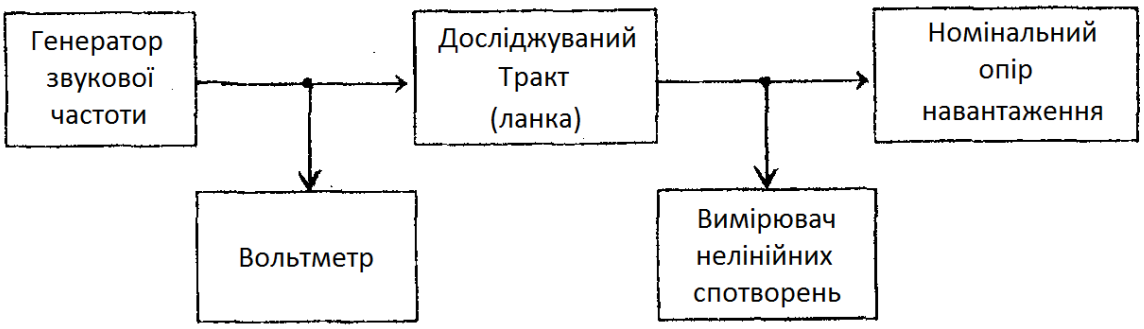


Рис.6.3. Схема вимірювання нелінійних спотворень методом одного тону

Рекомендаціями МСЕ встановлені наступні значення коефіцієнта гармонік (у %) при випробуванні синусоїдальних коливань в смузі частот:

0,04 ... 0,125 Гц 1%,
0,125 ... 7,5 Гц 1%,
0,05 ... 0,1 Гц. 2%,
0,1 ... 3,5 Гц 1,4%,
0,07 ... 0,1 Гц 2%,
0,1 ... 2,5 Гц 1,4%.

Вітчизняним ГОСТом для каналу 10 кГц визначені наступні норми коефіцієнта гармонік:

0,04 ... 0,125 Гц 2,6%,
понад 0,125 Гц 1,6%,
до 0,125 Гц 3,6%.

2.4. Шуми та завади

Будь-які коливання, які заважають сприйняттю корисного мовного сигналу, можна назвати завадами незалежно від природи їх виникнення. Заважаюча дія завад згідно з ДСТУ 11515 оцінюється різницею між рівнями корисного сигналу і завад (в дБ), яка називається захищеністю від завад:

$$С/З = 20 \lg (Uс/Uз), \qquad (6.1)$$

де Uc - номінальне значення максимальної напруги сигналу на виході тракту (ланки), Uз - напруга завади (шуму).

У мовленні прийнято нормувати захищеність від інтегральної завади, від псофометричного шуму і від виразної перехідної завади.

Схема вимірювання напруги інтегральної завади представлена на рис.6.4.

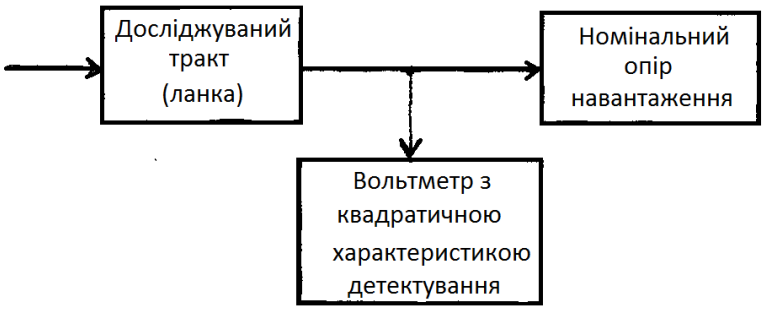


Рис.6.4. Схема вимірювання напруги інтегральної завади

Схема вимірювання псофометричної напруги шуму показана на рис.6.5.

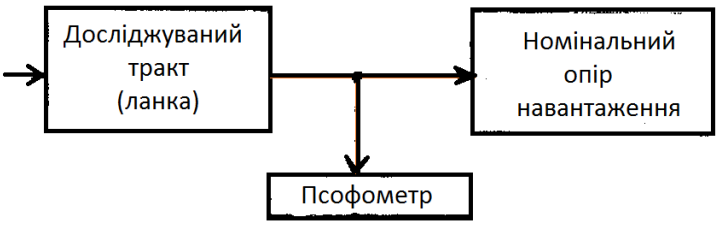


Рис.6.5. Схема вимірювання псофометричної напруги шуму

Псофометр є вольтметром з квадратичною характеристикою детектування, що містить псофометричний зважуючий фільтр.

Частотна характеристика зважуючого фільтру представлена на рис.6.6. Вона враховує *різну чутливість людського вуха до звукових коливань*. Коефіцієнт передачі цього фільтра в області середніх частот, до яких найбільш чутливе вухо, великий. А оскільки людське вухо чує нижні і верхні частоти гірше, то коефіцієнт передачі фільтра в області цих частот нижчий. У цьому і полягає суть «зважування». Якщо у вимірювачі застосований зважуючий фільтр з характеристикою типу А, то до виміряного значення захищеності слід додати 4 дБ.

За міжнародними нормами максимальний псофометричний рівень завад (шумів) згідно (6.1) у вільному каналі не повинен перевищувати в смугах:

0,04 ... 15 кГц -42 дБ,
0,05 ... 7 кГц -44 дБ,
0,07 ... 5 кГц -32 дБ.

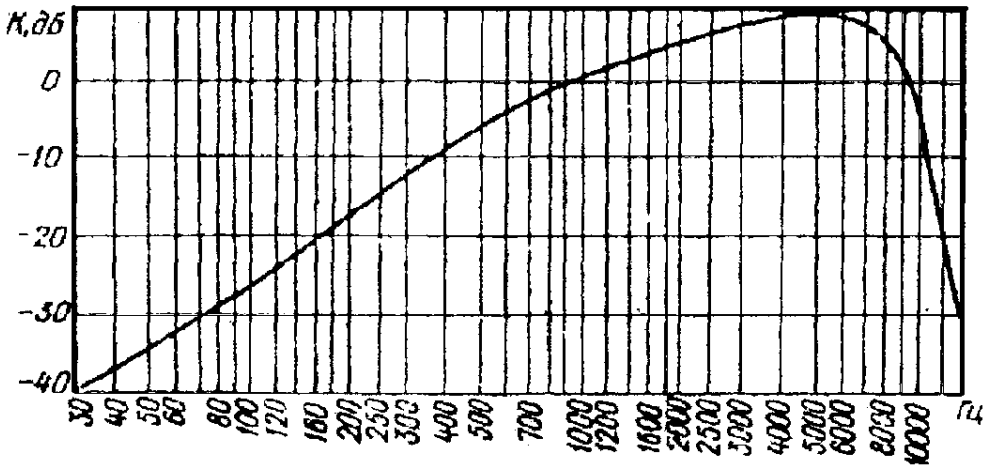


Рис.6.6. Характеристика зважуючого фільтру псофометра

Аналогічні норми за ДСТУ такі:

0,04 ... 15 кГц -40 дБ,

0,05 ... 10кГц -43 дБ,

0,1 ... 6,4кГц -39дБ.

Напруга перехідної (з одного каналу передачі в інший) завади вимірюється згідно з рис.6.7.

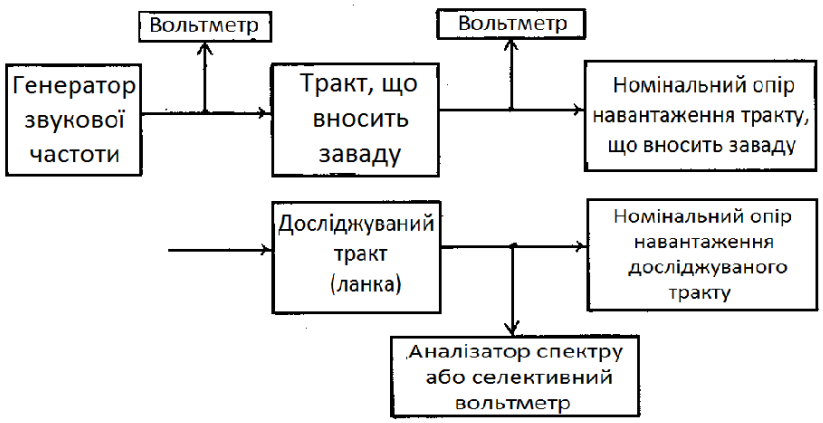


Рис.6.7. Схема вимірювання напруги виразної перехідної завади

Вимірювальний рівень на вході тракту, що вносить заваду, повинен бути рівний номінальному значенню максимального рівня. Частота вимірювальної завади прийнята рівною 1000 Гц. У вимірювальному тракті встановлюється необхідна діаграма рівнів. Величина напруги перехідної завади вимірюється на виході тракту аналізатором спектру (або селективним вольтметром).

Міжнародні норми на захищеність від виразної перехідної завади для каналу 0,04 ... 15 кГц повинні задовільняти представленим на рис. 6.8,а, а для каналів 0,05 ... 7 кГц і 0,07 ... 5 кГц - на рис. 6.8,б.

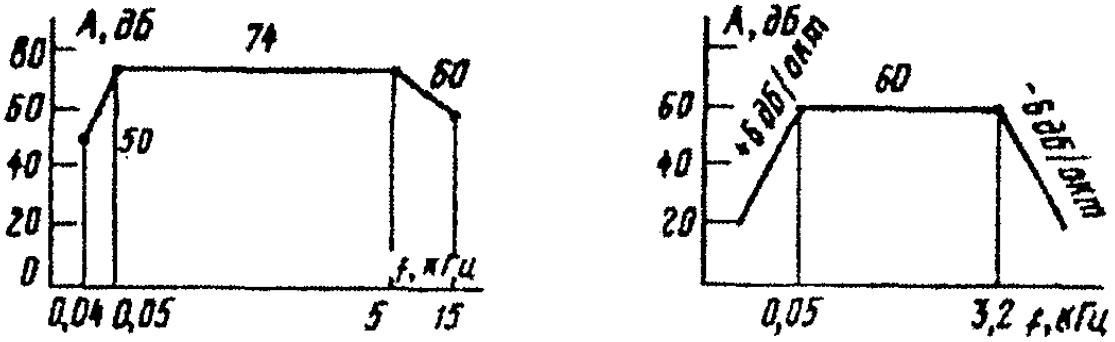


Рис. 6.8. Захищеність від виразної перехідної завади

Національні норми для каналів зі смугою 0,04 ... 15 кГц складають 74 дБ, для каналів 0,05 ... 10 кГц - 70 дБ, для каналів 0,1 ... 6,4 кГц - 60 дБ.

2.5. Інші норми на параметри мовних каналів

Для сигналів стереофонічного мовлення потрібні додаткові нормовані параметри, відхилення яких від встановлених норм також призводить до спотвореного сприйняття згаданих сигналів, що відрізняються від сигналів монофонічного мовлення.

Для *стереофонічних передач* міжнародними Рекомендаціями додатково нормуються:

- ***різниця рівнів на виході каналів*** **Л** і **П** при однакових рівнях сигналів на вході каналів (рис. 6.9, а),

- ***різниця фаз між каналами*** **Л** і **П** (рис.6.9,б).

Як уже згадувалося, на відміну від традиційного (загальноприйнятого визначення терміну «канал зв'язку») кінцеве обладнання користувача в ДСТУ 11515-90 до складу каналу не включено, оскільки за аргументаціями телерадіокомпаній вони не можуть нести відповідальність за дотримання параметрів цього обладнання.

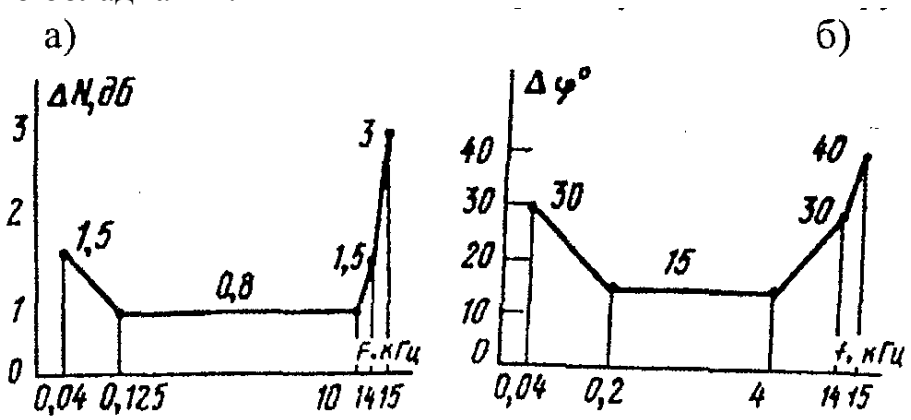


Рис. 6.9. Допуск на відмінність рівнів в каналах Л і П (а), допустимий зсув фаз між каналами Л і П (б)

При розробці чинного варіанту ДСТУ 11515-90 на якісні показники каналів мовлення представники промисловості домоглися виключення радіомовних

приймачів та абонентських пристроїв проводового мовлення з цього ГОСТу, мотивуючи це тим, що вимоги ДСТУ занадто жорсткі, а більшість слухачів не є «меломанами». В результаті зміст поняття «електричний канал звукового мовлення» виявилося усіченим.

У норми ДСТУ не включені спотворення, які можуть бути внесені антеною, середовищем розповсюдження, приймальним пристроєм і магнітофоном. Оскільки канал проводового мовлення (за ДСТУ) закінчується абонентської розеткою, ***параметри абонентського пристрою (наприклад, трьохпрограмного гучномовця) нормуються окремо, без спряження з параметрами попереднього тракту***. В результаті витрати на підтримання в належному стані параметрів каналів не виправдовуються через недостатність якості більшості приймальних пристроїв.

Зазвичай в ТУ на вироби, що входять до трактів звукового мовлення, нормуються і діаграми рівнів пристроїв (ланок) мовних трактів.

Під ***діаграмою рівнів*** розуміється графік зміни рівня напруги (або потужності) сигналу в окремих точках мовного тракту. Приклад такої діаграми для пульта звукорежисера представлений на рис.6.10.

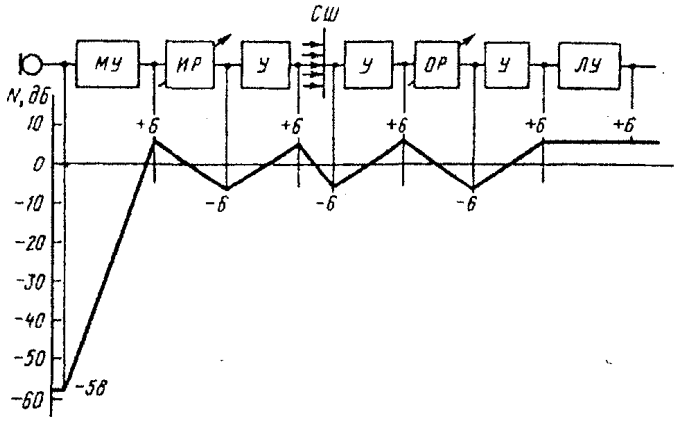


Рис.6.10. Приклад діаграми рівнів для структурної схеми пульта звукорежисера

Діаграми рівнів містяться під спрощеною структурною схемою тракту. Розрахункові або виміряні значення рівнів наносяться на лінії, опущені з відповідних точок структурної схеми і з'єднуються прямими лініями. Зростаючий або спадаючий хід лінії свідчить відповідно про посилення або ослаблення сигналу по тракту, а різниця чисельних значень рівня на кінцях прямолінійного відрізка - про значення посилення або послаблення.

Якщо в тракт входять ланки (наприклад, коректуючі контури), то діаграми рівнів будуються для декількох частот і перевіряється, чи не зближається неприпустимо близько рівень сигналу до рівня власних шумів або чи не перевищує рівень сигналу номінальне значення).

На рис. 6.10. показано наступне:

- рівень сигналу після мікрофона дорівнює 1 мВ, що відповідає -58 дБ,
- посилення мікрофонного підсилювача складає 64 дБ,

- індивідуальний і загальний регулятори (ИР та ОР) рівня послаблюють сигнали (індивідуальний і після змішувача) на 12 дБ,

- індивідуальний та групові підсилювачі мають коефіцієнт підсилення 12дБ.

Якщо прийняти рівень власних шумів тракту, приведених (перерахованих) до входу рівним - 133 дБ, то відношення сигнал/шум складе -58-(-133) = 75 дБ. Діаграма шумів лежить на 75 дБ нижче номінальної (на малюнку не показана).

Діаграми рівнів необхідні при

-проектуванні обладнання мовних трактів з метою виявлення «вузьких місць» тракту, в яких рівні сигналу неприпустимо наближаються до рівня внутрішніх шумів тракту,

-налаштуванні обладнання після його монтажу в радіодомі (телецентрі),

-при зчленуванні різних пристроїв тракту,

-при перевірці стану пристроїв тракту і пошуку місць ушкодження.

Відхилення виміряних рівнів від номінальних призводить до погіршення параметрів якості устаткування. Щоб цього не сталося, шляхом зміни положень установчих регуляторів вносяться поправки. Визнано, що більш раціонально зосередити основне підсилення у вхідній частині тракту і будувати діаграму рівнів так, щоб у наступних частинах тракту рівні залишалися приблизно однаковими (що й відображено на рис.6.10).

Зниження рівня в послаблюючих ланках (регулятори рівня і АЧХ, змішувальні шини СШ, фільтри) компенсується підсилювачами, включеними після кожної такої ланки. При такій побудові тракту ланки тракту можуть з'єднуватися в різних комбінаціях, наприклад для виключення з тракту невикористаних або пошкоджених.

3. Автоматизований контроль і управління в мережі звукового мовлення

Мережі та канали звукового та телевізійного мовлення безперервно (систематично) повинні контролюватися з метою перевірки якості на відповідність встановленим нормам. Об'єктами контролю можуть бути будь-які вузли і тракти формування і розподілу мовних програм.

Перевагу слід віддавати автоматизованим системах контролю. Нагадаємо, що ***автоматизованими*** називаються системи контролю, які реалізують свої функції за участю людини, а ***автоматичними*** - системи, що функціонують без участі людини. Орган управління повинен передавати по каналу, що перевіряється, перевірочні (тестові) випробувальні сигнали.

Зазвичай системи контролю доповнюються системами телеуправління (ТУ), які передають службові команди для вказування на об'єкт контролю, а при необхідності - і команд управління для корекції параметрів об'єкта контролю, наприклад, АЧХ (або заміна об'єкта, що вийшов з ладу на справний). Органу управління повинні передаватися результати контролю - телесигналізація (ТС), наприклад, у вигляді допускового контролю «в нормі» - «не в нормі». Так утворюється «контур управління» (кільце управління).

Інтенсивність сигналів ТУ залежить від величин неузгодженості нормативних та поточних параметрів об'єкта управління (контролю). Сукупність правил контролю і управління називається алгоритмом управління. Вони записуються в пам'яті керуючої ЕОМ. Об'єктами управління є канали, станції, центри системи (мережі) мовлення.

Органи управління визначаються ієрархічною структурою мереж радіо (і телевізійного) мовлення. Тому може існувати кілька самостійних і незалежних один від одного контурів контролю, в які «стікається» інформація про якість функціонування складових частин мереж звукового та телевізійного мовлення. Тому розрізняють регіональні, місцеві та локальні системи контролю, в яких може передбачатися дистанційне перемикання каналів мовлення. В даний час в експлуатації знаходяться автоматизовані комплекси різного призначення (наприклад, «Конус-3», «Контроль», «Зона-ТВ»).

Таким чином, основу будь-якої системи автоматизованого (автоматичного) контролю утворює обладнання формування та передачі випробувальних сигналів (тест-сигналів) і сигналів телеуправління і телесигналізації (ТУ - ТС).

У системах автоматизованого контролю і управління розрізняють:

- ***Наскрізний контроль*** (контроль сукупності трактів первинного та вторинного розподілу програм, каналів та їх елементів за вихідними параметрами органу управління),
- ***Допусковий контроль*** (контроль параметрів об'єкта управління за критерієм, який визначає вихід параметра за межі допускового інтервалу),
- ***Періодичний контроль*** (контроль параметрів об'єкта управління через певний проміжок часу, за який зміна параметрів не перевищує допускову норму),
- ***Безперервний контроль*** (контроль поточних параметрів об'єкта управління з метою виявлення тенденції їх зміни, статистики),
- ***Місцевий контроль*** (контроль параметрів у межах станції, апаратної),
- ***Дистанційний контроль*** (контроль параметрів в об'єкті, розміщеному в іншій апаратній, станції).

Найбільш ефективно завдання контролю вирішуються при введенні в кожен елемент мережі мовлення спеціальної контрольно-вимірювальної апаратури, що дозволяє в автоматичному режимі здійснювати процедури комутації і вимірювань, аналізу та обчислень параметрів, збереження і передачі результатів контролю до органу управління.

В силу різноманітності обладнання в трактах і мережах мовлення, різна і використовувана контрольно-вимірювальна апаратура (наприклад, апаратура контрольно-розподільчої апаратної і апаратура ефірного контролю радіомовних і телевізійних станцій).

Розгляд функціонування згаданих вище комплексів автоматизованого контролю знаходиться за межами даної книги. Для ілюстрації нижче викладається варіант контролю якості каналу звукового мовлення за допомогою випробувальних сигналів по відмітках точного часу і варіант контролю цілісності каналу по пілот-тону.

Контроль якості каналу здійснюється протягом п'яти останніх секунд кожної години, коли в мовному сигналі робиться “перерва” на передачу сигналів єдиного часу. Починаючи з 55-ої секунди щосекундно передаються короткі (тривалістю 0,1 сек) тональні посилки з звуковою частотою 1000 Гц. Тривалість останньої (шостої) посилки цього тону складає 0,5 сек. Ці сигнали формуються ***державною автоматизованою системою єдиного часу технічної точності*** (ТЕХРОН) і використовуються для метрологічного забезпечення єдиної автоматизованої мережі зв'язку та інших систем. Рівень сигналів складає 0 дБ.

Оскільки канали звукового мовлення можуть відрізнятися класами якості, то випробувальні сигнали повинні забезпечувати об'єктивну оцінку будь-якого тестового каналу, незалежно від його електричних характеристик. Це досягається особливою формою випробувального сигналу.

Для наскрізних вимірювань параметрів каналів мовлення та допускового контролю використовується спеціальний сигнал універсальної форми, який називається ***сигналом звірки часу з підвищеною інформативністю***. Він є послідовністю згаданих вище міток точного часу, в які підмішуються додаткові синусоїдальні коливання, що лежать в спектрі звукових частот від 30 Гц до 15000 Гц (з рівнем -20 дБ), рис. 6.11.

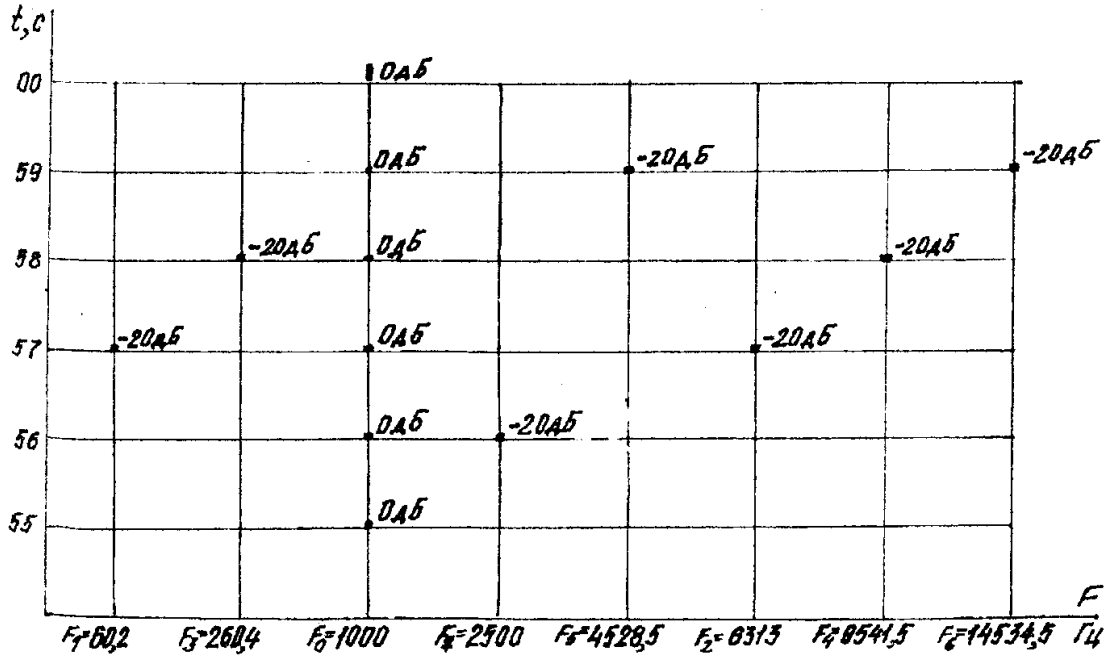


Рис.6.11. Випробувальний сигнал звукового мовлення

Зразу після 55-ої секунди передається мітка основного тону (1000 Гц).

Друга мітка крім основного тону містить відрізок синусоїди з частотою 2500 Гц. У третій, четвертій і п'ятій мітках розміщаються трьохчастотні коливання відповідно з частотами (1000 Гц, 60,2 Гц і 6313 Гц), (1000 Гц, 260,4 Гц і 9541,5 Гц) та (1000 Гц, 4528,5 Гц і 14534,5 Гц). Остання позначка тривалістю 500 мс містить тільки основний тон.

Вибір значення еталонних частот в мітці точного часу і послідовність їх введення в випробувальний канал забезпечує комплексну оцінку характеристик електричного каналу звукового мовлення будь-якого класу, табл.6.1.

Таблиця 6.1. Комплексна оцінка характеристик електричного каналу звукового мовлення за сигналами еталонних частот.

Клас якості	Смуга частот, Гц	Параметри каналів		
		$F_н$	$F_{сер}$	$F_в$
ВИЩИЙ	30…15000 Гц	+2дБ(F_1)…+2дБ(F_3)	2дБ (F_2,F_5,F_7)	-3дБ(F_6) …+2дБ(F_4)
		$К_г$=2,5% (F_0)	$N_ш/N_{ном}$=3 дБ	
ПЕРШИЙ	50…10000 Гц	+2,3дБ(F_1 F_3)	-3,7дБ(F_0) …+2,3дБ(F_3, F_7)	-4,9дБ(F_4) …+2,3дБ(F_2)
		$К_г$=5% (F_0)	$N_ш/N_{ном}$=3 дБ	
ДРУГИЙ	100…6300 Гц	+2,3дБ(F_3)	+2,3дБ(F_7)	+2,3дБ(F_5)
		$К_г$=5% (F_0)	$N_ш/N_{ном}$=3 дБ	

При наскрізних вимірах каналів мовлення оцінюються:

- номінальна смуга переданих частот,
- нерівномірність АЧХ на певних частотах (в дБ),
- величина нелінійних спотворень (Кг у%),
- захищеність від зваженого та незваженого шуму і виразної завади,
- точність установки рівня,
- різниця фаз у стереоканалах Л і П,
- різниця рівнів на виходах каналів Л і П.

Наскрізні вимірювання проводяться тільки в каналах, вільних від передачі мовних програм. Допусковий контроль може проводитися шляхом введення тестових сигналів у мовну програму або у вільні від неї канали.

Систематичний безперервний контроль цілісності каналів здійснюється за допомогою автоматизованої апаратури допускового контролю, яка генерує спеціальний випробувальний сигнал, який називається пілот-тоном. Це - еталонний синусоїдальний сигнал з частотою **Fпт = 125 Гц** з рівнем мінус 53 дБ (що практично виключає його вплив на сигнали програм). Наявність пілот-тону на виході каналу свідчить про її цілісність (справність).

У випадку, якщо приймальна частина апаратури допускового контролю виявить зниження рівня пілот-тону на 8 дБ (тобто нижче -61 дБ) протягом 6 сек, то вона виробляє сигнал «Обрив», що свідчить про порушення цілісності каналу.

Перевищення сигналу вище номінального рівня (що відповідає 100-відсотковій модуляції) ведуть до неприпустимих нелінійних спотворень. Сигнал «ПЕРЕВИЩЕННЯ» фіксується при підвищенні рівня на 3 дБ не менше трьох разів протягом 60 сек при контролі до обмежувача і при підвищенні рівня на 1 дБ при контролі після обмежувача.

У радіомовленні зниження рівня сигналу нижче номінального призводить до «недомодуляції» передавача та зменшення зони впевненого прийому мовних програм. При зниженні максимального рівня сигналу щодо нормованого значення на 3 дБ протягом 3 хвилин виробляється сигнал «ЗНИЖЕННЯ МАКС». При зниженні максимального рівня сигналу на 26 дБ протягом 10 хвилин виробляється сигнал «ЗНИЖЕННЯ МІН». При зниженні максимального значення на 42 дБ протягом 10 хвилин виробляється сигнал «ПРОПАДАННЯ». Оскільки при передачі мовних програм можливі технологічні перерви, що перевищують 60 секунд, то сигнал «пропадання» аналізується спільно з сигналом «ОБРИВ» (для виключення помилкових тривог).

При автоматичній оцінці параметрів каналів мовлення та зняття статистичних даних (про їх зміни в процесі експлуатації) важливо знати час проведення вимірювань каналів. З цією метою в мітки часу 59-ої секунди вводиться спеціальна ознака, яка дозволяє визначити значення кожної години добового часу. Це здійснюється шляхом широтно-імпульсної модуляції частоти F_6 = 14534,5 Гц. Кількість можливих станів частоти F_6 рівна 24 (за кількістю годин у добі). Модуляція здійснюється за командами системи ТЕХРОН. Таким чином, кожне вимірювання параметрів каналу мовлення супроводжується передачею та реєстрацією (документуванням) часу контролю.

Питання для самоконтролю

1. Що мається на увазі під об'єктивною і суб'єктивною оцінкою спотворень у мовному каналі? Як вони виконуються?
2. Стандартами передбачені мовні канали з різною смугою частот. Аргументуйте, з якими цілями це зроблено.
3. Яка аргументація покладена в основу класифікації обладнання для радіомовлення у відповідності з якістю звучання?
4. Аргументуйте, чи корельовані об'єктивні і суб'єктивні оцінки спотворень в мовних каналах.
5. Як кількісно оцінюються частотні спотворення мовних сигналів? Як вони впливають на якість звучання? Аргументуйте, чому норми на частотні спотворення неоднакові для каналів з різною шириною смуги частот.
6. Як кількісно оцінюються фазові спотворення мовних сигналів? Чи нормуються вони (якщо нормуються, то вкажіть норми)?
7. Що розуміється під нелінійними спотвореннями в каналі мовлення? Як вони вимірюються і для яких цілей?
8. Аргументуйте, чому для каналів мовлення з різними смугами введені різні норми на нелінійні спотворення?
9. Аргументуйте причини нормування інтегральних завад у каналах мовлення. Які це норми?

10. Аргументуйте причини нормування псофометричних шумів (завад) у каналах мовлення? Які це норми?
11. Аргументуйте причини нормування виразних перехідних завад у каналах мовлення? Які це норми?
12. Чи нормуються технічні характеристики стереофонічних каналів (і якщо нормуються, то які норми)?
13. Що розуміється під діаграмою рівнів у пристроях трактів мовлення? Аргументуйте, для яких цілей введена діаграма рівнів?
14. Як здійснюєтья контроль якості і цілісність каналів мовлення за допомогою системи ТЕХРОН?

ДОДАТОК Е. РИСУНКИ ДО ЛЕКЦІЇ №6

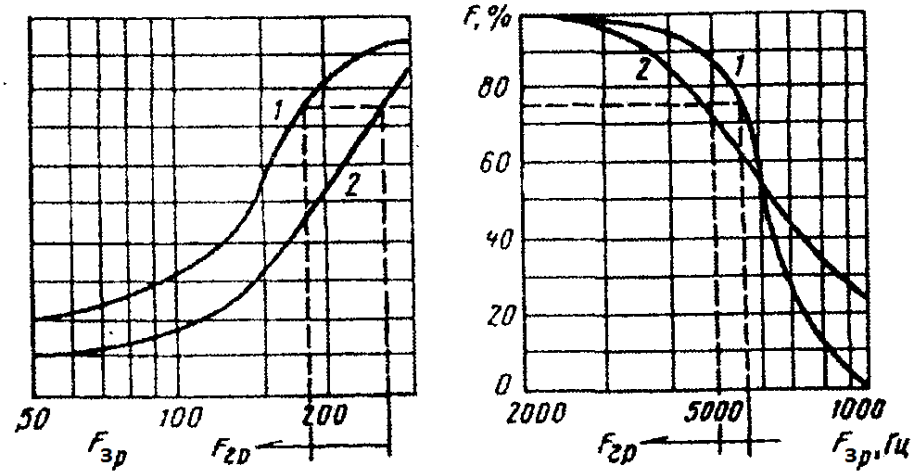


Рис. 6.1. Помітність обмеження частотного діапазону мовних сигналів (моно)

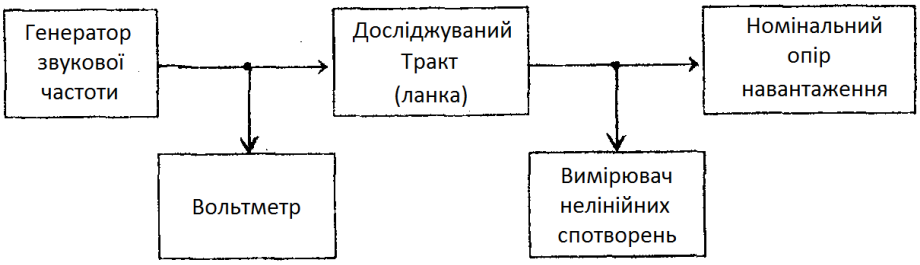


Рис.6.3. Схема вимірювання нелінійних спотворень методом одного тону

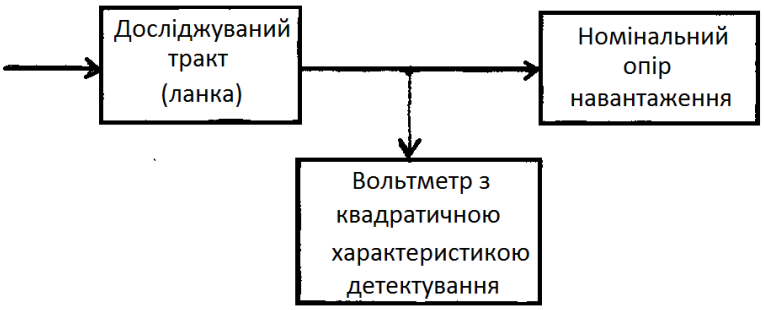


Рис.6.4. Схема вимірювання напруги інтегральної

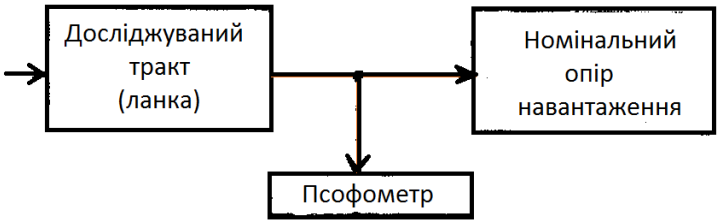


Рис.6.5. Схема вимірювання псофометричної напруги шуму

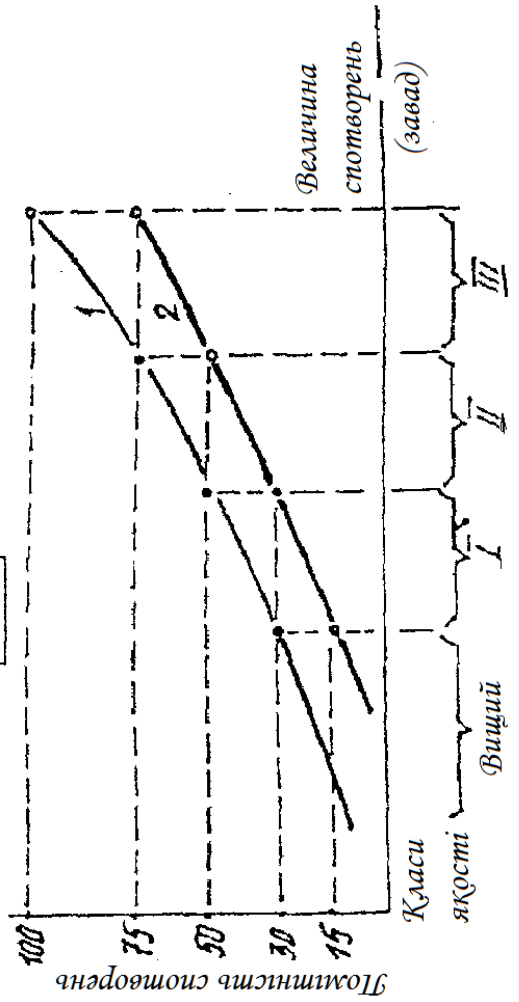


Рис.6.2. Принцип присвоєння обладнанню мовлення прийнятих класів якості звучання

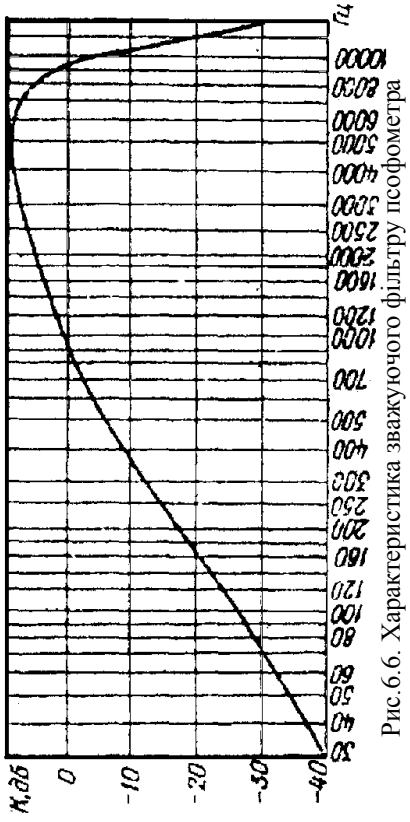


Рис.6.6. Характеристика зважуючого фільтру псофометра

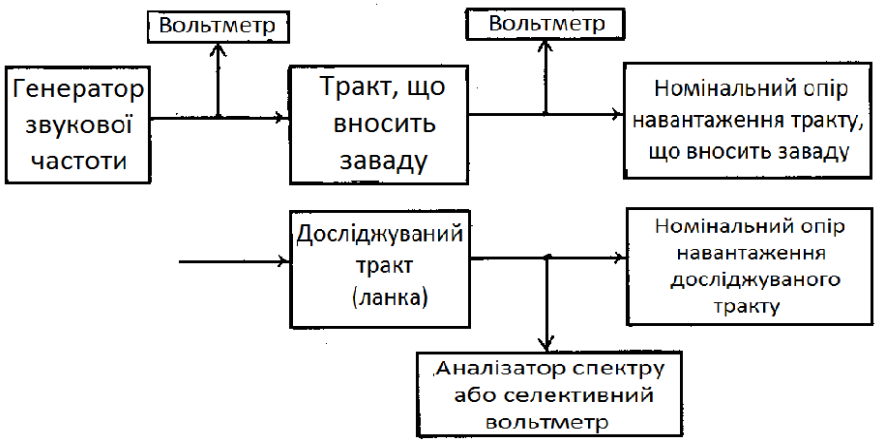


Рис.6.7. Схема вимірювання напруги виразної перехідної завади

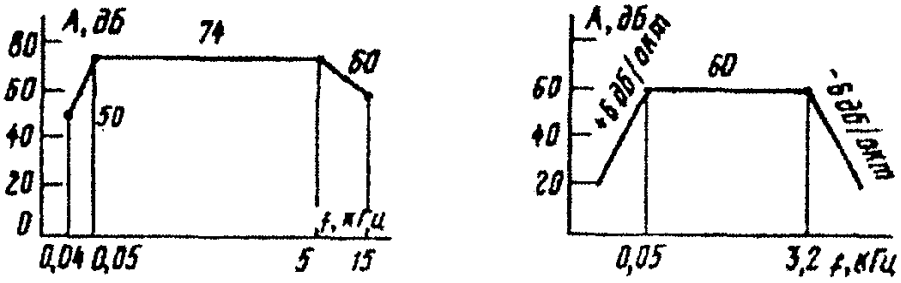


Рис. 6.8. Захищеність від виразної перехідної завади

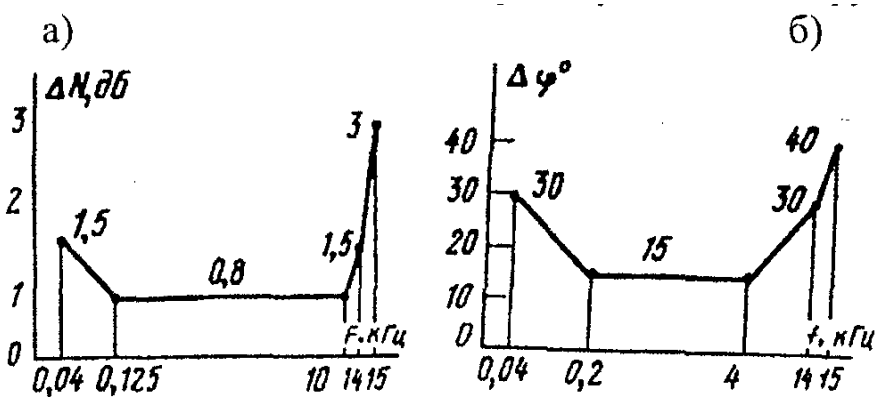


Рис. 6.9. Допуск на відмінність рівнів в каналах Л і П (а), допустимий зсув фаз між каналами Л і П (б)

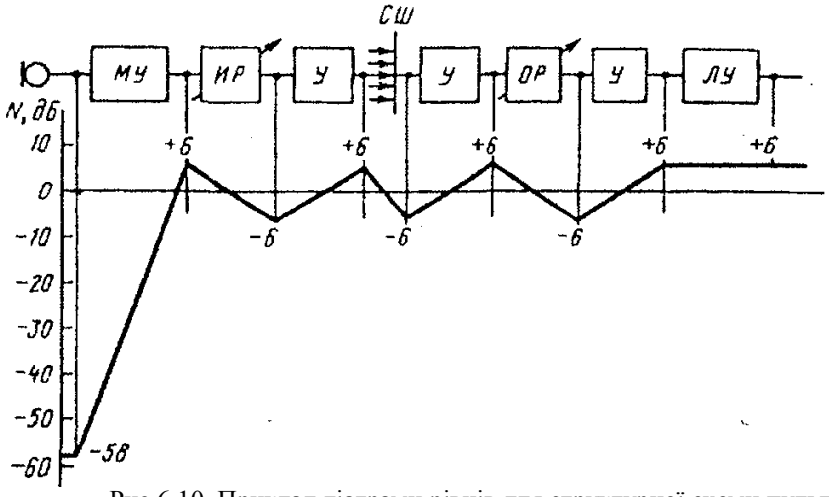


Рис.6.10. Приклад діаграми рівнів для структурної схеми пульта звукорежисера

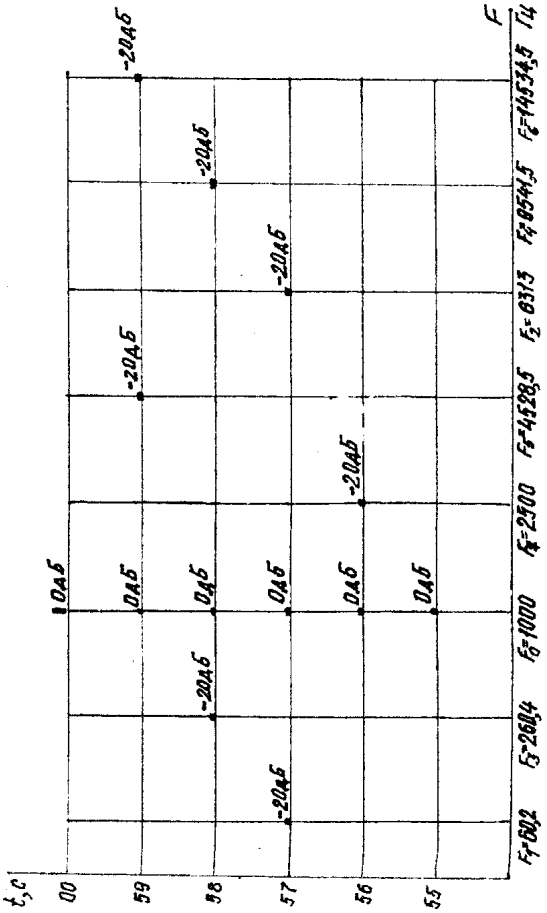


Рис.6.11. Випробувальний сигнал звукового мовлення

Таблиця 6.1. Комплексна оцінка характеристик електричного каналу звукового мовлення за сигналами еталонних частот.

Клас якості	Смуга частот, Гц	Параметри каналів		
		$F_н$	$F_{сер}$	$F_в$
ВИЩИЙ	30…15000 Гц	+2дБ(F_1)…+2дБ(F_3)	2дБ (F_2,F_5,F_7)	-3дБ(F_6) …+2дБ(F_4)
		$K_г$=2,5% (F_0)	$N_ш/N_{ном}$=3 дБ	
ПЕРШИЙ	50…10000 Гц	+2,3дБ(F_1 F_3)	-3,7дБ(F_0) …+2,3дБ(F_3, F_7)	-4,9дБ(F_4) …+2,3дБ(F_2)
		$K_г$=5% (F_0)	$N_ш/N_{ном}$=3 дБ	
ДРУГИЙ	100…6300 Гц	+2,3дБ(F_3)	+2,3дБ(F_7)	+2,3дБ(F_5)
		$K_г$=5% (F_0)	$N_ш/N_{ном}$=3 дБ	

ЛЕКЦІЯ №7 ТРАКТ ПЕРВИННОГО РОЗПОДІЛУ ПРОГРАМ МОВЛЕННЯ

ЛІТЕРАТУРА:

- Брагин А.С. Технологии вещательных служб. Часть 1. Технологии звукового радиовещания. –К.: НТУУ «КПИ», 2006.
- Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов./Под ред. Ю. А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком., Радио и связь, 2007. – 872 с.

РОЗДАТНИЙ МАТЕРІАЛ: див. ДОДАТОК Е

1. Структура тракту первинного розподілу програм мовлення

1.1. Структура тракту

На рис. 7.1 приведений фрагмент спрощеної схеми тракту формування сигналів мовлення й мережі розподілу сигналів мовлення від головного центру (столиці) до районів.

Тракт первинного розподілу програм звукового мовлення - це частина електричного каналу звукового мовлення, яка починається на виході радіобудинку (або телецентру) і служить для передачі сигналів на радіомовні (радіопередавальні) станції й станції проводового мовлення.

Апаратні засоби й з'єднувальні лінії тракту первинного розподілу програм виконують наступні функції:

− подачу модулюючих сигналів на мовні радіопередавачі й контроль за їх функціонуванням,

− розподіл програм мовлення по передавачах і трактах проводового мовлення, міжміських каналах звукового мовлення й радіобудинках,

− контроль і посилення сигналів отримуваних програм мовлення,

− коректування АЧХ з'єднувальних ліній.

Кінцева ***міжміська мовна апаратна*** (МВА) розміщується в обласному центрі й здійснює контроль, резервування й комутацію міжміських каналів звукового мовлення й з'єднувальних ліній (до КРА, радіобудинку й ін.), тобто здійснює безперебійні прийом, передачу й розгалуження програм мовлення, а також забезпечує взаємозаміну міжміських каналів мовлення.

Канал між кінцевими міжміськими мовними апаратними різних міст називається міжміським каналом звукового мовлення. Кінцева радіорелейна станція - це радіорелейна станція, що встановлюється на крайових пунктах радіорелейної лінії зв'язку й призначена для введення й виділення повідомлень, що передаються по цій лінії.

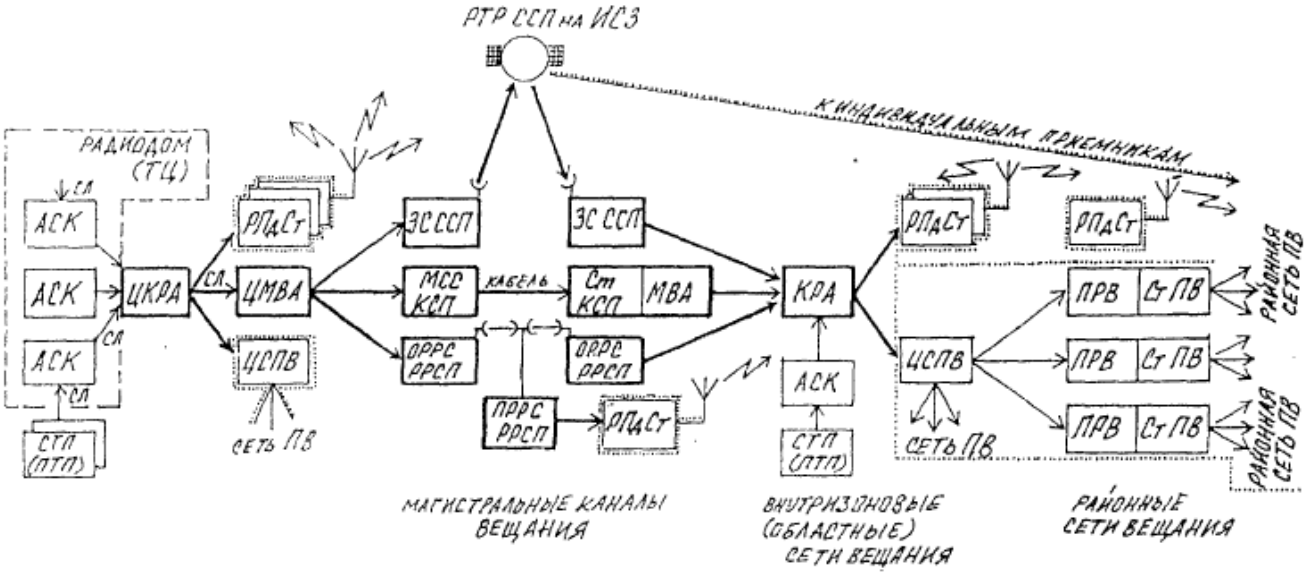


Рис. 7.1. Фрагмент спрощеної схеми тракту формування сигналів вішання й мережі розподілу сигналів мовлення від головного центру до районів

Потовщенням виділений тракт первинного розподілу програм; Пунктирні лінії відносяться до трактів вторинного розподілу програм

Позначення:

АСК - аппаратно-студійний комплекс,
СЛ - сполучна лінія,
РТП - рухлива трансляція пункт,
ЦКРА - центральна контрольно-розподільна апаратна,
КРРСт РРСП - крайова радіорелейна станція радіорелейної системи передачі,
ПРРСт РРСП - проміжна радіорелейна станція радіорелейної системи передачі,
РТР ССП - ретранслятор (на ІСЗ) супутникової системи передачі,
СПТ - стаціонарний пункт трансляції,
РПдСт- радіопередавальна станція (телевізійного або радіомовлення),
ЦММА - центральна міжміська мовна апаратна,
ММС КСП - міжміська мережева станція кабельної системи передачі,
Ст КСП - станція кабельної системи передачі,
ММА - міжміська мовна апаратна,
КРА - контрольно-розподільна апаратна,
ПРМ - пульт районного мовлення станції дротяного мовлення **(СтДМ).**

З'єднувальні лінії трактів первинного розподілу *- це канали обмеженої протяжності (разом з фізичними лініями) між різними апаратними, а також між відповідною апаратною й радіопередавачем або станціями проводового мовлення.*

Станція проводового мовлення *призначена для прийому, перетворення і посилення сигналів звукового мовлення абонентам.*

Сигнали мовлення з радіобудинку (телецентру) по з'єднувальних лініях поступають у центральну контрольно-розподільну апаратну.

Далі сигнали передаються:

− на радіомовні станції (зазвичай розміщувані на передавальних радіоцентрах),

− у центральну станцію проводового мовлення (у столиці),

− у центральну міжміську мовну апаратну.

З виходу останньою сигнали мовлення можуть подаватися на

− земну станцію системи супутникового зв'язку,

− міжміську мережеву станцію кабельної системи передачі,

− кіецеву радіорелейну станцію радіорелейної системи передачі.

Відмітимо, що електричні сигнали програм мовлення доцільніше вводити в загальний потік інформації, який передається по міжміських лініях систем передачі, що володіють високою пропускною спроможністю.

У цьому випадку вартість експлуатації одному каналу звуковою мовлення визначатиметься лише долею від загального потоку інформації, що доводити на тракт транспортної мережі. У цьому випадку передача сигналів мовлення йде на високих частотах (а не в смузі частот первинного звукового сигналу, наприклад, 0,03...15 кГц).

Високочастотні канали мовлення володіють підвищеними порівняно із звукочастоними каналами рівнем шуму.

В обласних центрах країни сигнали від перерахованих систем (одній або два) поступають у контрольно-розподільну апаратну. З'єднувальні лінії з її виходу до радіомовних станцій і центральної станції проводового мовлення обласного центру є останньою ланкою тракту первинного розподілу програм мовлення.

На рис. 7.1 поданий варіант відгалуження сигналів мовлення через проміжну радіорелейну станцію для передачі на радіомовну станцію іншого обласного центру.

1.2. З'єднувальні лінії

З'єднувальні лінії зв'язують між собою різні територіально рознесені апаратні звукового мовлення.

Відмітимо, що з'єднувальні лінії (разом з підсилювальними опціями), що пов'язують трансляційні пункти (у видовищних або спортивних підприємствах) з радіобудинком (телецентром) до складу тракту первинного розподілу програм не входять. Вони входять до складу тракту формування програм.

Канали із смугою частот до 15 кГц утворюються апаратурою з'єднувальних ліній. У якості апаратури з'єднувальних ліній можуть також використовуватися апаратура утворення каналів звукового мовлення (аналогова й цифрова) і канали звукового мовлення на піднесучих частотах у радіорелейних системах передачі обмеженої протяжності. Лише в окремих випадках використовуються кабельні з'єднувальні лінії.

Із згаданих міркувань на кресленнях, що представляють структурні схеми трактів первинного розподілу або його ділянок, з'єднувальні лінії часто зображаються у вигляді прямокутників (а не у вигляді звичайних ліній).

Сигнали програм передаються по з’єднувальних лініях або струмами сигналів мовлення (звукової частоти), або через апаратуру каналоутворення (із застосуванням модуляції) з частотним або часовим розділенням каналів.

Спеціальні кабелі як з’єднувальні лінії для мовних каналів практично не застосовуються. Як правило, на правах оренди використовуються симетричні пари дротів міських кабелів зв'язку.

Навантаженням з’єднувальних ліній може служити вхідний опір апаратури. Величина його вибирається близькою до модуля хвилевого опору Zв симетричної пари кабелю на середніх звукових частотах і стандартизується (150 або 600 Ом). У діапазоні звукових частот Zв змінюється від декількох тисяч на нижніх частотах до одній-двох сотень Ом на високих. Це означає, що з’єднувальна лінія вносить амплітудно-частотні спотворення: замість горизонтальної прямої АЧХ матиме спадаючі ділянки на крайніх частотах.

Рис.7.2 відображає еквівалентну схему з’єднувальної лінії (а) довжиною *d* з еквівалентними километричними параметрами R, L, G, C та орієнтовний хід частотної характеристики загасання лінії $a_л(f)$, а також необхідної характеристики загасання коректуючого контуру $a_к(f)$ для вирівнювання АЧХ $a_л(f)+ a_к(f)$. Дві схеми коректуючих контурів представлено на рис.7.2,в.

Примітка. Отут доречно відзначити походження терміну «еквалайзер». В 20-х роках минулого століття мовні компанії орендували кабелі телефонних компаній спочатку для проводового мовлення в межах одного міста, а пізніше й для міжміських підключень. Проводові лінії вносили істотне загасання на верхніх частотах мовного сигналу. Вихід з положення був знайдений наступний. На передавальному кінці в лінію подавалися тестуючі тони різних частот одного й того ж рівня. На віддаленому кінці лінії вимірювався рівень прийнятого тону, і підключалися елементи корекції до тих пір, поки на всіх тестованих частотах рівні не встановляться однаковими, вирівнюються, стають еквалізованими (equalized).

Пізніше було встановлено, що з появою звукового кіно звучання в різних приміщення виявлялося істотно різним. У студіях перезапису звучання було прекрасно відрегульоване звукорежисером, але в одних залах приглушалося, а в інших ставало крихким.

Для регулювання налаштування якості звучання в залах фахівці скористалися досвідом телефонних компаній з тією лише відмінністю, що замість аварійного набору коректуючих елементів використовувався прилад з цими елементами й перемикачами. Прилад отримав найменування еквалайзер.

Такий прилад спробували використовувати й у павільйонах перезапису, щоб отримати ті або інші звукові ефекти.

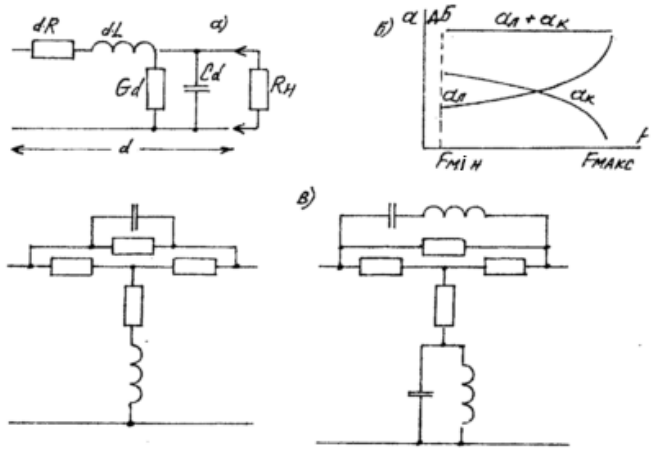


Рис. 7.2 Кабельна з’єднувальна лінія, її параметри й корекція загасання

У даний час еквалайзери є обов'язковими в студіях звукообробки, але не на користь вирівнювання рівнів у необхідній смузі частот, а для:

− поліпшення розбірливості мовних передач,
− усунення деяких специфічних видів шумів,
− допомоги при зведенні записів,
− легкої й простої зміни звучання,
− підкреслення басового ритму в музичному фрагменті,
− імітації деяких гучномовних пристроїв,
− компенсації деяких недоліків системи звуковідтворення.

Еквалайзери не можуть використовуватися для усунення шумів, для виправлення спотворених частин програми.

У системах мобільного зв'язку й цифрового радіомовлення на приймачі в рухомому транспорті принципи еквалайзінга (регулювання АЧХ фільтрів у приймальних трактах) використовуються для компенсації спотворень, що викликаються багатопроменевістю поширення радіохвиль.

Як видно з рис. 7.2,б, загальне загасання лінії разом з коригувальним контуром зростає. Зі збільшенням довжини лінії зменшується рівень сигналу на навантаженні. Це зменшення можна було б компенсувати більшим рівнем сигналу на вході лінії. Однак максимальний рівень сигналу на вході лінії нормується - звичайно не більше +15 дБ при рівні на виході не менш 0 дБ.

Перевищення встановленого рівня приведе до появи помітних перехідних завад на інших парах кабелю (і появі завад на даній парі від інших пар). Норма на вхідний рівень встановлена виходячи з реальних значень перехідного загасання між парами кабелю.

Рівень на виході з’єднувальної лінії також нормований, але виходячи з інших міркувань. Якщо рівень вибрати менше, то зменшується співвідношення сигнал/шум на вході апаратури, включеної на кінці лінії, що знижує якість сигналу мовлення. Довжина з’єднувальних ліній при діаметрі жили кабелю від 0,8 до 1,4 мм становить приблизно 10 км. Для компенсації великого загасання в з’єднувальній лінії через певні її ділянки включаються проміжні підсилювачі. При

використанні жили діаметром 0,5 мм припустима довжина становить орієнтовно 5 км. Тому проміжні підсилювачі по довжині кабелю необхідно включати частіше.

Для передачі стереофонічних сигналів (Л и П) використовуються дві однакові пари кабелю, щоб розбіжності величин загасання, АЧХ і ФЧХ були найменшими. Вони обумовлюються лише конструктивними допусками на діаметр жил і товщину ізоляції.

На з'єднувальних лініях великої довжини (наприклад ліній, що з'єднують радіобудинок із заміськими радіомовними центрами) для економії числа пар кабелю використовуються багатоканальні системи з частотним або часовим поділом каналів. Для їхньої організації звичайно застосовується типова аналогова або цифрова апаратура ущільнення.

2. Організація міжміських каналів звукового мовлення

Тракти первинного розподілу програм на основі міжміських каналів звукового мовлення створюються відповідно до переліку й призначення програм звукового мовлення й утворюють магістральну мережу. Вона будується на основі кабельних, радіорелейних і супутникових систем зв'язку найчастіше по радіалъно-вузловому принципу.

Для підвищення технічної надійності системи мовлення основні й резервні канали організуються в різних системах зв'язку. Та або інша система передачі мовних програм вибирається після техніко-економічного порівняння варіантів.

Внутрішньозонова мережа будується по радіальному принципу. Програми мовлення з обласних центрів надходять до місцевих радіомовних станцій й у районні центри кожної області, а відтіля на районні й сільські станції проводового мовлення.

На всіх віщальних апаратних, вхідних у тракти первинного розподілу програм, є пристрої для перевірки стану й параметрів якості міжміських каналів мовлення.Значення контролю істотно зростає через створення служби сертифікації й підвищення відповідальності підприємств зв'язку за якість звучання.

2.1 Аналогові міжміські канали звукового мовлення

Особливістю використання каналів цих систем є відмінність ширини смуги частот каналів ТЧ і мовних каналів. Тому при використанні типової аналогової (додамо, і цифрової) багатоканальної апаратури **для одному каналу мовлення потрібно два або три канали ТЧ.**

Рис.7.3 відображає частотний план первинної групи системи передачі (з 12-ю каналами ТЧ у смузі 60 ... 108 кГц) і місця розташовуваних каналів мовлення в даній системі, табл. 7.1.

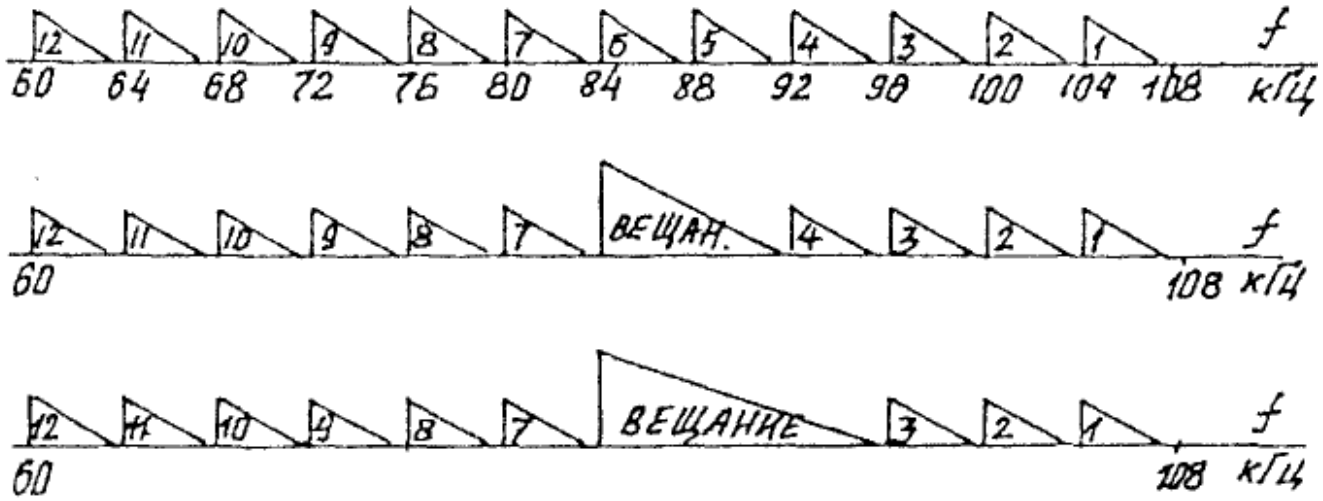


Рис.7.3. Частотний план первинної групи системи передачі й місця розташовуваних каналів мовлення в даній системі.

Таблиця 7.1. Місця розташовуваних каналів мовлення в 12-канальній системі передавання

Число займаних (каналом мовлення) каналів тональної частоти	2	3
Номера займаних каналів ТЧ	4-й й 5-й	4-й, 5-й й 6-й
Займана віщальним каналом смуга частот	89,6...95,95 кГц	86...95,95 кгц
Смуга частот сигналу звукового мовлення	50... 6400 Гц	50... 10000 Гц

Для обміну стереофонічними програмами між містами необхідна організація магістральних стереофонічних каналів. Стереофонічний канал повинен складатися мінімум із двох монофонічних каналів вищого класу, що мають малі неузгодженості амплітудно- і фазочастотних характеристик. Це пов'язане з тім, що неузгодженість АЧХ усього на 1,5...2 дБ приводить до появи просторових спотворень стереопанорами, зсуву уявних звукових образів від їхнього дійсного положення. Аналогічно проявляються й фазочастотні неузгодженості.

Високоякісні сигнали стереомовлення (30 ... 15000 Гц) можуть займати весь спектр 12-канальної первинної групи (канал Л займає смугу частот 67,2...81,97 кГц, канал П - 86,3 ... 102,8 кГц).

У груповому спектрі передбачене місце для передачі пілот-сигнала, що використовується для якісної демодуляції й керування рівнем у прийомному тракті апаратури.

Організувати стереофонічний канал, використовуючи два монофонічних канали, утворених у різних стандартних групах систем із частотним поділом каналів, неможливо.

Так, вже давно перебуває в експлуатації (застаріла) апаратура спеціально для утворення міжміських високочастотних каналів АВ-2/3, що забезпечує канали тільки першого, а не вищого класу якості. У ній допускається нерівномірність

АЧХ до 2,5 дБ, а фазочастоная характеристика взагалі не нормується. Крім того, через відсутність синхронізації генераторного устаткування передавальної й прийомної сторони міжміського каналу мовлення фазове зрушення між каналами виявляється випадковим і безупинно міняється, що привело б до неприпустимих перекручувань стереопанорами.

Викладене отут ще раз підкреслює строгість дотримання вимог до стереофонічних каналів.

2.2. Канали звукового мовлення в цифрових системах передачі

Частота дискретизації для каналу ТЧ із верхньою частотою 3,4 кГц, звичайного телефонного зв'язку вибирається (відповідно до теореми В.А.Котельникова) рівною 8 кГц. Для утворення цифрового каналу ТЧ застосовується 8-розрядний код з нерівномірним квантуванням. Швидкість цифрового потоку при цьому становить 64 Кбіт/с (без обліку надмірності). Ця швидкість у цифровій системі передачі (ЦСП) є найменшою, а канал, по якому ведеться передача з такому л швидкістю, називається ***основним цифровим каналом***. На його основі будуються більш швидкісні канали й тракти.

Можливості передачі мовних програм по каналах цифрових систем передачі проілюструємо прикладами.

На рис.7.4 для прикладу подан формат 30-канальної апаратури ІКМ. Каждому телефонному каналу (з 1-го по 30-й) у форматі визначений проміжок часу в циклі. Частину часового циклу займають службовий канал і канал синхронізації.

Нарощування обсягу переданої інформації досягається збільшенням швидкості передачі. Класифікують: ***субпервичний***, цифровий канал зі швидкістю передачі 480 Кбіт/с, ***первинний*** - 2048 Кбіт/с, ***вторинний*** - 8448 Кбіт/с, ***третинний*** - 34386 Кбіт/с, ***четвертинний*** - 139464 Кбіт/с.

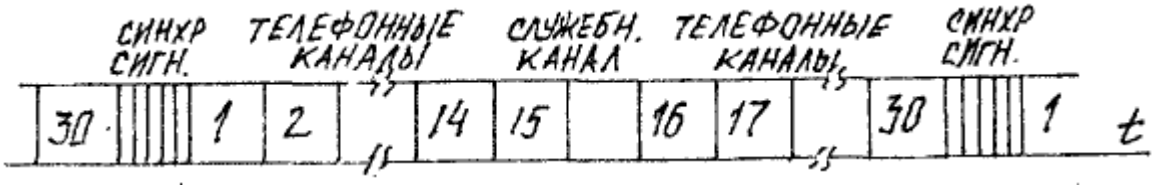


Рис.7.4. Формат 30-канальної апаратури ІКМ

Висока вірогідність передачі по ЦСП зробила актуальною передачу по них й сигналів мовлення, у тому числі - стереофонічних. При передачі сигналів цифрового мовлення параметри аналого-цифрового перетворення вибираються такими, щоб результуюча швидкість цифрового потоку була кратна швидкості одного з типів перерахованих каналів або трактів, що цілком природно.

Цифрові сигнали звукового мовлення, як було показано вище, можуть передаватися по каналах кабельних, волоконно-оптичних, радіорелейних і супутникових систем.

Залежно від системи передачі й середовища поширення сигнали формуються з параметрами, найбільшою мірою відповідним властивостям середовища (лінії). У тому числі враховується вплив завад, що характерний для даної лінії.

При сполученні тракту формування мовних програм із цифровими трактами первинного розподілу можливі варіанти:

− аналоговий тракт формування програм з'єднується йз трактом первинного розподілу через АЦП,

− цифровий тракт формування програм з'єднується йз трактом первинного розподілу через аналоговий інтерфейс,

− цифровий тракт формування програм з'єднується йз трактом первинного розподілу через цифровий інтерфейс, тобто без переходу до аналогової форми.

В останньому випадку необхідність в АЦП на вході тракту первинного розподілу відпадає, але виникає завдання з'єднання цифрових сигналів на виході тракту формування програм і вході тракту первинного розподілу по швидкості.

Відзначимо, що в *устаткуванні тракту формування програм* прийнята частота дискретизації звукових сигналів, рівна **48** кГц, а при організації цифрових каналів для передачі мовних сигналів з граничною частотою 15 кГц - **32** кГц.

Залежно від застосовуваного методу стиснення цифрового потоку можуть розрізнятися й швидкості передачі. Крім того, якщо цифровий сигнал мовлення вводиться в тракт первинного розподілу разом з іншими сигналами, то швидкість цифрового потоку для мовлення повинна бути кратною швидкості основного цифрового каналу, тобто 64 Кбіт/с.

При переході сигналу від однієї ЦСП в іншу (з параметрами, що відрізняються від першої системи) може знадобитися узгодження швидкостей і форматів переданих сигналів. Деяку частину цифрового потоку займає передача символів захисту від помилок для корекції останніх у місці прийому. Тому результуюча швидкість передачі сигналів мовлення в середовищі передачі ще більше зростає.

Дослідження показали, що цифровий канал звукового мовлення можна організувати зі швидкістю передачі 64 х 5 = 320 Кбіт/с (при частоті дискретизації звукового сигналу 32 кГц із застосуванням методу майже миттєвого компандирования). При цьому в потоці первинного цифрового каналу (2048 кбит/с) можна передати всього три стереофонічних програми.

При використанні інших методів аналого-цифрового перетворення можна організувати передачу сигналів звукового мовлення зі швидкістю 384 Кбіт/с (і більшої). У цьому випадку в первинному каналі вдається організувати два стереофонічних й один монофонічний канал звукового мовлення. Наведені приклади показують важливість завдання зменшення швидкості цифрового потоку при оцифровці аналогового сигналу.

Прикладами ЦСП, у яких організуються канали звукового мовлення, є системи ІКМ-12М, ІКМ-15 й ІКМ-30.

Апаратури ІКМ-12М и ІКМ-15 призначена для сільського зв'язку. У ній можливо організувати один канал звукового мовлення зі смугою 0,1...6,4 кГц замість двох телефонних.

В апаратурі ІКМ-30 замість чотирьох телефонних каналів утвориться канал звукового мовлення зі смугою 50 ... 10000 Гц. Він займає 1-й, 9-й, 17-й й 26-й тимчасові інтервали в первинних трактах ЦСП. Застосовано розрядн-8-розрядне нелінійне компандирование.

3. Передача сигналів звукового мовлення по радіорелейних лініях

Для передаячі сигналів у високочастотному «аналоговому» стволі РРЛ часто застосовується смуга частот (на вході частотного модулятора передавача РРС) від 50 Гц до 9 МГц. При цьому в смузі до 6 МГц розташовується телевізійний канал зображення (або 1920 телефонних каналів ТЧ з частотним розділенням каналів від відповідної апаратури ущільнення). Смуга частот від 6 до 9 МГц відводиться для передавання на піднесучих частотах від двох до чотирьох сигналів звукового мовлення, в тому числі звукового супроводу зображення.

Будь-які два канали одного ствола РРЛ можна використовувати для стерео передавання, оскільки за відмінністю коефіцієнтів передачі, різниці фаз, коефіцієнту гармонік (викривлення) та перехідному загасанню вони відповідають вимогам, що пред’являються до стереоканалів.

Максимальна девіація частоти в кожному каналі звукового мовлення складає ± 100 кГц. В останніх розробках введено частотні перед спотворення з постійною часу 50 мкс, що підвищує завадостійкість каналу на 3…5 дБ.

На основі аналогових стволів РРЛ створено й експлуатуються цифрові тракти звукового мовлення. В якості апаратури первинного групоутворення застосовується вищезгадана апаратура ОЦ-480.

Ствол аналогової РРЛ, рис.7.5 може бути повністю занятий для передачі цифрових сигналів із швидкістю 8448 Кбіт/с (а). Або крім аналогового телевізійного (або багатоканального телефонного) ствола (б) в ньому додатково до каналів телебачення (або каналів ТЧ) створюється цифровий тракт каналів звукового мовлення (наприклад, із загальною швидкістю 2048 Кбіт/с) на піднесучій частоті fп = 7,68 МГц.

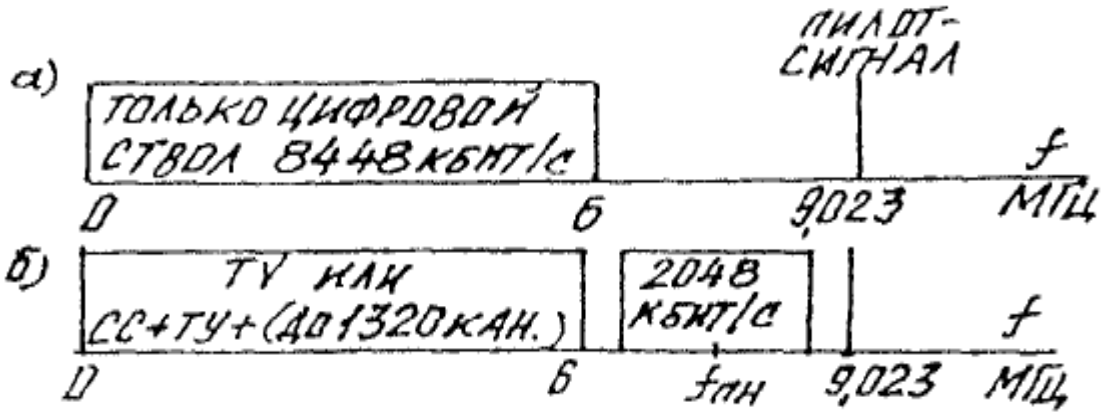


Рис.7.5 Варіанти зайнятості аналогового ствола РРЛ для передачі цифрових сигналів

4. Передача сигналів звукового мовлення по супутникових лініях (*рос. мовою*)

Схема организации передачи сигналов ЗВ через спутниковые системы связи (ССС) показана на рис. 15.18. При этом используются аналоговые и цифровые способы передачи. При первом способе поднесущие частоты $f_{п1}$ и $f_{п2}$ располагают выше верхней границы спектра сигнала телевизионного (ТВ) изображения $S_{из}$ (рис. 15.19). Штриховой линией изображен спектр мощности помех (шумов) на выходе частотного детектора, на вход которого воздействует флуктуационный (тепловой) шум с равномерным спектром. Спектр сигналов ЗВ $S_{зв1}$ и $S_{зв2}$ попадает в область возрастающей интенсивности спектра мощности помех $S_{ш}$. Если для передачи сигналов ЗВ использовать однополосную модуляцию, как в системах с ЧРК, то для получения требуемого отношения С/П потребуется бóльшая мощность. При этом значительная часть девиации частоты (ТВ) ствола будет затрачена на передачу сигнала ЗВ, и качество передачи телевизионного сигнала ухудшится. Лучшее отношение С/П получается при ЧМ. Сигналы ЗВ модулируются по частоте поднесущими, расположенными в области частот 6,5...8,5 МГц, в частотном модуляторе $ЧМ_1$, а затем в сумматоре Σ складываются с ТВ сигналом и поступают на вход $ЧМ_2$ (рис. 15.20).

Итак, сигнал ЗВ подвергается двойной ЧМ. Ввиду расширения спектра сигнала получается дополнительный выигрыш в помехоустойчивости. Поскольку спектр ЗВ на несколько порядков уже спектра сигнала ТВ изображения, расширение спектра на выходе ЧМ существенной роли не играет и отношение С/П для канала ЗВ практически не ухудшается. Для улучшения С/П в каналах ЗВ применяют компандерные системы.

На этом принципе организованы каналы ЗВ в ССС «Орбита», «Орбита-2», «Орбита-2м», «Экран», «Экран-М», «Москва», «Москва-Глобальная». В системах «Орбита», «Орбита-2», «Орбита-2м» поднесущие частоты 7; 7,5 и 8,2 МГц, максимальная девиация частоты ±150 кГц.

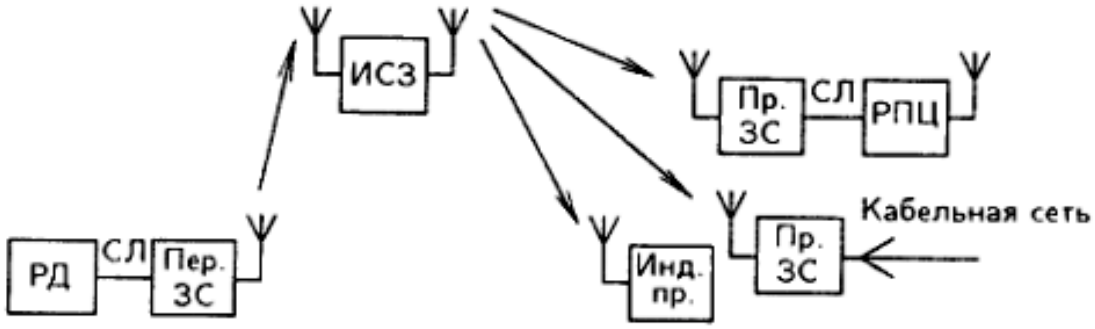


Рис. 15.18. Схема организации каналов передачи сигналов ЗВ в спутниковых системах связи: РД — радиодом; Пер. ЗС — радиопередатчик земной станции; Пр ЗС — радиоприемник земной станции; РПЦ — радиопередающий центр; Инд. пр — индивидуальные преемники

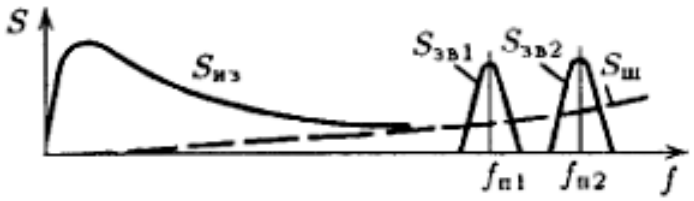


Рис. 15.19. Спектры сигналов изображения $S_{из}$, звука $S_{зв1}$, $S_{зв2}$, помех (шума) $S_ш$

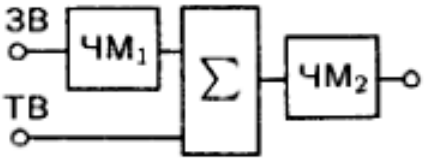


Рис. 15.20. Структурная схема формирования сигнала в системе с двойной ЧМ

Девиация несущей сигналом поднесущей не превышает ±1,5 МГц, т.е. 10 % от девиации несущей сигналом ТВ изображения. В канале передачи звуковой части телевизионной программы системы «Экран», «Экран-М» ($F_{п1} = 6{,}5$; $F_{п2} = 7{,}0$) частота первой поднесущей — 6,5 МГц, а максимальная девиация ее частоты ±50 кГц, что совпадает с аналогичными параметрами наземной системы ТВ вещания. Но это достоинство несколько умаляется тем, что необходимо увеличивать максимальную девиацию частоты несущей ЧМ сигналом звука до ±2,8 МГц. Это ухудшает отношение С/П в канале изображения на 2 дБ. Недостаток пере-

дачи сигналов ЗВ на поднесущих частотах — возможность нелинейных переходов сигнала изображения в тракт ЗВ. Для уменьшения этой опасности приходится предъявлять очень жесткие требования к линейности общего канала. На второй поднесущей передаются сигналы ЗВ. Полоса частот каналов звука составляет 50...10000 Гц.

При передаче сигналов ЗВ с ЧРК возможен обмен программами между несколькими земными станциями, поскольку через один ствол можно вести передачу в различных направлениях. Но из-за присущих этому способу нелинейных переходов удается организовать не более 8–10 каналов ЗВ с максимальной частотой 10 кГц в полосе частот ствола 35МГц. Очевидно, что полоса частот используется неэффективно. Этот способ организации каналов ЗВ в модифицированном виде реализован в аппаратуре «Градиент–В». Изменение заключается в том, что сигнал ЗВ преобразуется в цифровую форму, а затем передается при помощи ФМ несущей. При скорости передачи 480 кбит/с образуются каналы с шириной полосы частот 15 кГц. Мощность сигнала ЗВ в таком канале примерно эквивалентна мощности десяти телефонных сигналов. Поэтому одну программу ЗВ передают взамен сообщений в десяти телефонных каналах.

Структурная схема каналообразующей аппаратуры «Градиент-В» показана на рис. 15.21. В передающую часть входят ФНЧ, сжиматель Сж, АЦП, устройство помехоустойчивого кодирования УПК и модулятор М. Частота дискретизации ЗС равна 32 кГц, число разрядов в кодовой слове m-10, скорость цифрового потока на выходе АЦП $v = mf_д = 10 \cdot 32 = 320$ кбит/с. Кодовые комбинации, поступающие в АЦП, преобразуются в помехоустойчивый код путем добавления проверочных символов. В результате скорость передачи ЗС увеличивается до 480 кбит/с. В модуляторе несущая манипулируется по фазе цифровым сигналом. После других преобразований в аппаратуре «Градиент-В»

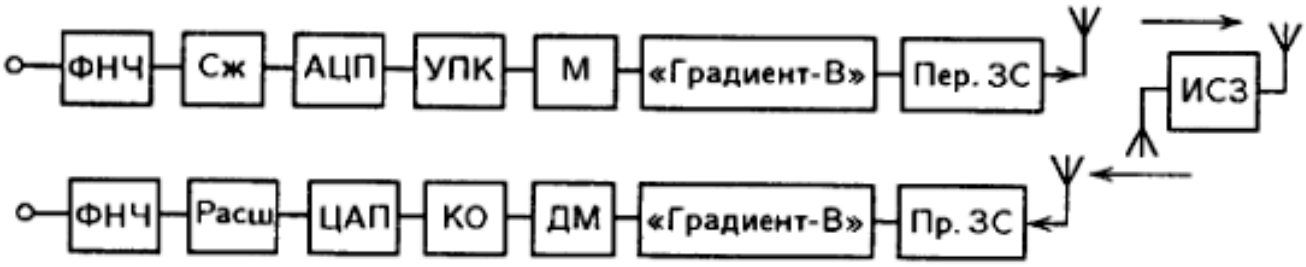


Рис. 15.21. Структурная схема каналообразующей аппаратуры «Градиент-В»

сигналы поступают через передатчик земной станции (Пер.ЗС) на бортовую аппаратуру спутника, излучаются, а в приемной земной станции Пр.ЗС проходят демодулятор ДМ, корректор ошибок КО, ЦАП, расширитель Расш и ФНЧ.

Значительные преимущества при передаче сигналов ЗВ дает цифровая передача с временны́м разделением каналов (ВРК). Помех нелинейного вида в этой системе не возникает, поэтому ВЧ ствол используется эффективнее, чем при ЧРК. Возможна организация 89–90 каналов вместо 8–10 при ЧРК.

Способ ВРК применен в аппаратуре «Орбита-РВ», предназначенной для передачи большого числа программ в разные районы страны при помощи геостационарных спутников. Система «Орбита-РВ» занимает лишь половину ствола. Вторая половина ствола используется для телефонной связи. Для высококачественных каналов ЗВ с полосой частот 0,04...15 кГц частота дискретизации равна 32 кГц, для каналов ЗВ с полосой частот 0,05...10 кГц — 21,3 кГц, для каналов с полосой частот 0,1...6,4 кГц — 14,2 кГц. В каналах с полосой частот 15 кГц применено 10-разрядное кодирование с мгновенным компандированием, в каналах с полосами частот 10 и 6,4 кГц — 9-разрядное. Скорости передачи цифрового потока соответственно равны 320, 192 и 128 кбит/с. В цифровом потоке 2048 кбит/с аппаратуры «Орбита-РВ» образуют либо шесть каналов с полосой частот 15 кГц, либо десять — с высшей частотой 10 кГц, либо 15 с высшей частотой 6,4 кГц. Всего для передачи сигналов ЗВ выделяют два потока со скоростью 2048 кбит/с каждый.

В системе «Орбита-РВ» одновременно передаются 25 программ ЗВ и сигналы изображения газетных полос ИГП. Сигналы ЗВ на входе передающего комплекта (рис. 15.22,*а*) преобразуются в дискретную форму в АЦП. При этом используется нелинейное 13-сегментное мгновенное компандирование ЗС. В результате этого неравномерного квантования 9-разрядное кодирование отсчетов ЗС, примененное в каналах с полосами частот 10 и 6,4 кГц, становится эквивалентным 13-разрядному равномерному квантованию. Далее в блоке ПК осуществляется помехоустойчивое кодирование. Затем в блоке ОЦП и ВК четыре цифровых потока сигналов ЗВ по 2048 Мбит/с объединяются с цифровым сигналом ИГП, подвергаются временно́й компрессии, проходят фазовый модулятор ФМ и на промежуточной частоте 70 МГц подаются на передатчик. Скорость общего цифрового потока несколько превышает 10 Мбит/с.

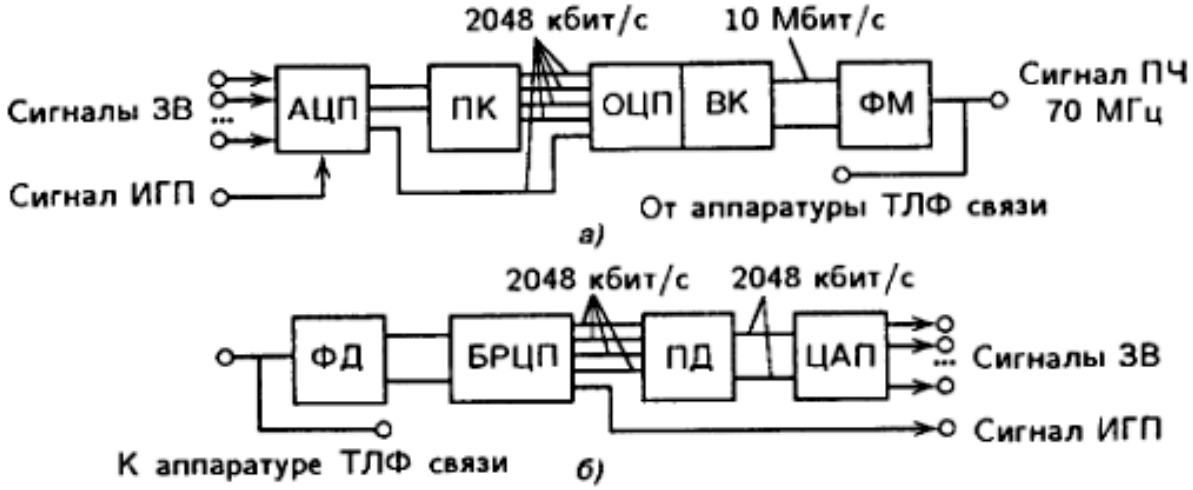


Рис. 15.22. Структурные схемы передающего (*а*) и приемного (*б*) комплектов аппаратуры «Орбита-РВ»

В приемном комплекте (рис. 15.22,*б*) преобразования происходят в обратном порядке. Сигналы проходят фазовый демодулятор ФД, блок разделения цифровых потоков БРЦП, помехоустойчивый декодер ПД и ЦАП. Цифровые сигналы ЗВ подвергаются временно́й компрессии из-за того, что необходимо высвободить время для передачи сигналов телефонии ТЛФ.

Особенность системы «Орбита-РВ» — возможность использования незакрепленных каналов ЗВ, число которых равно числу одновременно передаваемых программ. Любой декодер приемной станции можно переключить на необходимую временну́ю позицию по команде, передаваемой из центра управления сетью в общем потоке с информационными посылками.

Самыми многочисленными звеньями спутниковых систем вещания служат земные приемные станции. Земные станции систем «Москва» и «Экран» предназначены для приема с ИСЗ частотно-модулированных сигналов изображения, звуковой части ТВ программы и ЗВ. Сигналы преобразуются в форму, принятую для наземного вещания. В системе «Москва» используется специализированный ствол ИСЗ «Горизонт» с центральной частотой 3675 МГц. В ИСЗ «Экран» используется диапазон частот 702...726 МГц. В восточной части обслуживаемой территории сигналы программ передаются со сдвигом на 2 ч в диапазоне частот 742...766 МГц.

Комплекс оборудования приемной станции «Москва» содержит антенну, малошумящий усилитель МШУ и стойку преобразования и усиления сигналов (рис. 15.23,*а*). В стойке осуществляется перенос сигналов на промежуточную частоту, усиление и демодуляция полного сигнала, выделение и демодуляция поднесущих частот звуковой части ТВ сигнала и ЗВ. Станция комплектуется ТВ ретранслятором диапазона метровых волн. Сигнал ЗВ распределяется через технические средства вещания — передатчик или сеть ПВ.

Приемная стойка содержит полосовой фильтр ПФ, смеситель СМ, предварительный усилитель промежуточной частоты ПУПЧ. Промежу-

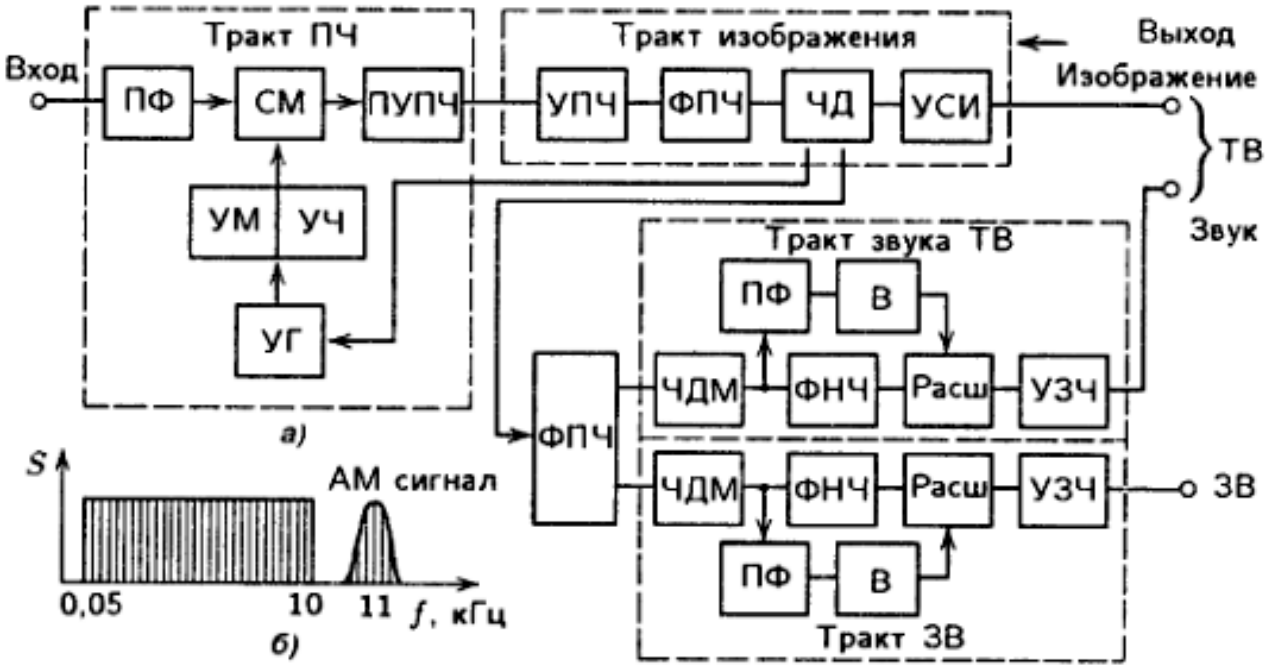


Рис. 15.23. Структурная схема стойки преобразования и усиления сигналов приемной станции «Москва»

точная частота равна 70 МГц. Источником напряжения гетеродина в тракте ПЧ служит цепь, содержащая двухкаскадный усилитель мощности (УМ) и два варакторных умножителя частоты УЧ, увеличивающих исходную частоту в $6 \times 4 = 24$ раза. На вход этой цепи поступает напряжение от управляемого транзисторного генератора УГ, частота которого может изменяться в пределах 150 МГц под воздействием управляющего напряжения цепи вывода дисперсии с выхода ЧД.

С выхода ПУПЧ сигнал поступает в тракт изображения. В нем осуществляется усиление, фильтрация и демодуляция в звеньях УПЧ, ФПЧ и ЧД. Далее следует усилитель сигнала изображения УСИ.

Сигнал звуковой части ТВ программы передается на поднесущей частоте 7,0 МГц с девиацией частоты ±150 кГц. На поднесущих 7,5 и 8,2 МГц передаются сигналы ЗВ и изображений газетных полос ИГП. Максимальная модулирующая частота тракта ЗВ — 10 кГц.

Сигналы на поднесущих частотах через фильтр поднесущих частот (ФПН) поступают в тракты звуковой части программы ТВ и ЗВ. Тракты содержат частотные демодуляторы ЧДМ с обратной связью по частоте ОСЧ. Такие устройства позволяют снизить порог при частотной модуляции на 4...5 дБ по сравнению с обычным частотным детектором.

После ЧДМ следуют ФНЧ, расширители динамического диапазона Расш, системы шумопонижения при помощи управляемого компандирования (см. гл. 11) и усилители звуковых частот УЗЧ. Сигнал, необходимый для управления коэффициентом передачи расширителей, передается на поднесущей частоте 11 кГц методом АМ. Для его выделения используют узкополосные ПФ со средней частотой 11 кГц. Далее сигнал управления выпрямляется выпрямителем (детектором) В и подается в качестве управляющего напряжения E_y на расширители. Спектр сигнала на выходе ЧДМ показан на рис. 15.23,*б*.

Приемные устройства системы «Экран» более просты и дешевы. Это позволяет использовать их для обслуживания сравнительно небольших населенных пунктов и индивидуальных потребителей. С целью упрощения приемных устройств повышена мощность передатчика бортовой аппаратуры ИСЗ. Частота поднесущей звуковой части ТВ программы выбрана 6,5 МГц, т.е. равна разности несущих частот изображения и звука при наземном ТВ вещании. Это упростило формирования стандартного сигнала ТВ вещания. Девиация частоты поднесущей по той же причине составляет ±50 кГц. В приемных устройствах системы «Экран» предусмотрена возможность приема сигнала ЗВ только в устройствах первого класса, т.е. с высшей частотой 10 кГц. Поднесущая сигнала ЗВ равна 7 МГц. В тракте ЗВ применены девиация частоты ±150 кГц, управляемое компандирование, ЧД с ОСЧ.

Для приема сигналов используют профессиональные приемники, на выходе которых выделяются сигналы изображения и звука, а также сигнал ЗВ. Более просты индивидуальные (абонентские) приемники. Оба вида приемных устройств содержат малошумящий входной усилитель, преобразователь частоты, УПЧ, ЧД. Далее сигналы разделяются и преобразуются в сигнал с АМ несущей изображения и ЧМ несущей звука, т.е. становятся подобными стандартному сигналу ТВ вещания, и в такой форме подаются на вход ТВ приемника.

В приемной станции коллективного приема после всех перечисленных операций преобразования формируется стандартный ТВ сигнал одного из ТВ каналов 1-го, 2-го или 3-го диапазонов. Передатчик, входящий в комплект приемной станции, имеет мощность 10 Вт.

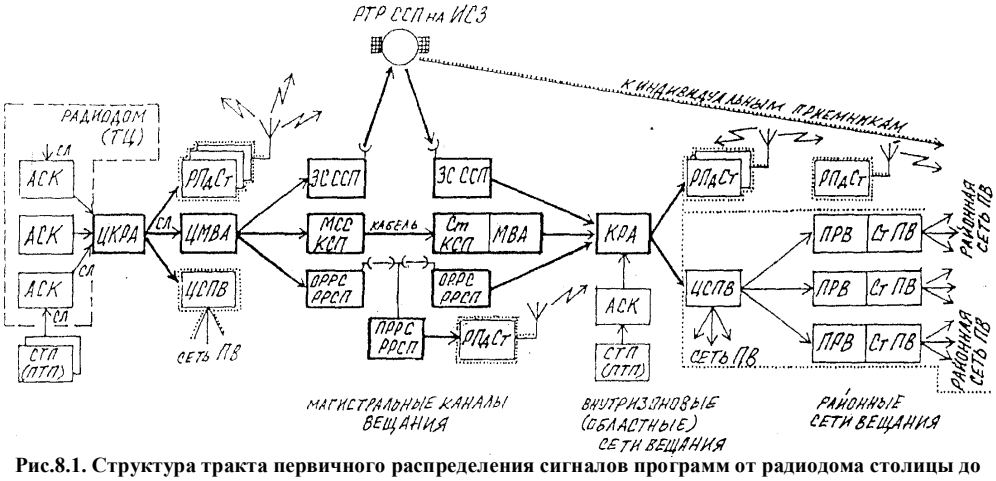
В системах «Москва» и «Экран» для повышения помехоустойчивости использовано предельное сжатие динамического диапазона ЗС. Оно реализовано в виде устройств так называемого управляемого компандирования (см. разд. 11.11). Предельное сжатие дает значительный выигрыш в отношении С/П (15...18 дБ). Заметим, что в обычной компандерной системе выигрыш составляет в среднем 10...12 дБ.

Для передачи сигнала управления действием расширителя использован отдельный узкополосный тракт; спектр управляющего сигнала в нем занимает полосу частот 11000±120 Гц. Регулируемое звено расширителя перемножает сигнал на его огибающую и восстанавливает таким образом первоначальный динамический диапазон сигнала ЗВ.

Питання для самоконтролю

1. Аргументуйте склад тракту первинного розподілу мовних програм.
2. Дайте характеристику з’єднувальних ліній в складі тракту первинного розподілу мовних програм.
3. Дайте коротку характеристику мережі магістральних каналів мовлення. Яким чином мовні канали «вписуються» в частотний план апаратури канало утворення тональної частоти ?
4. Аргументуйте особливості передачі мовних сигналів з використанням радіорелейних ліній.

ДОДАТОК Є. РИСУНКИ ДО ЛЕКЦІЇ №7



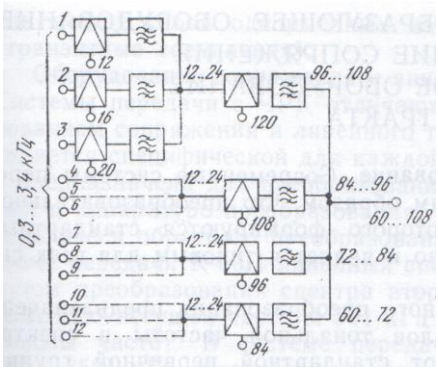


Рис.8.1. Структура тракта первичного распределения сигналов программ от радиодома столицы до областных и районных сетей вещания

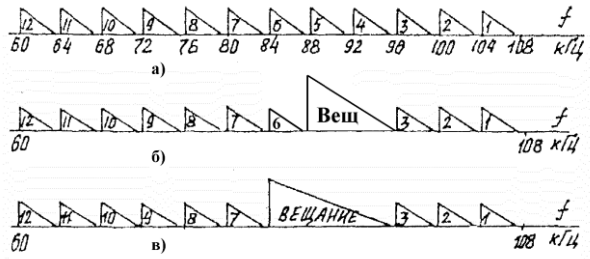


Рис.8.3. Первичная группа каналов (а) и формирование монофонического канала вещания в аппаратуре АВ-2/3

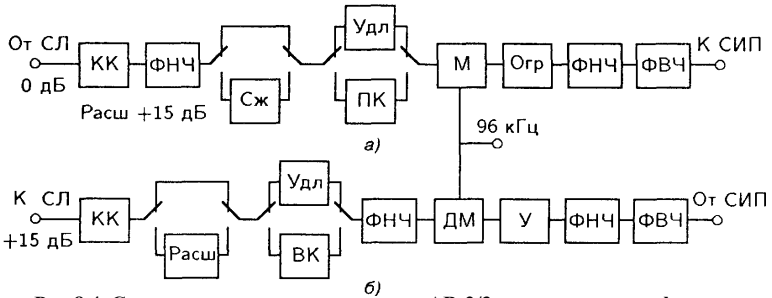


Рис.8.4. Структурная схема аппаратуры АВ-2/3 для канала монофонического вещания

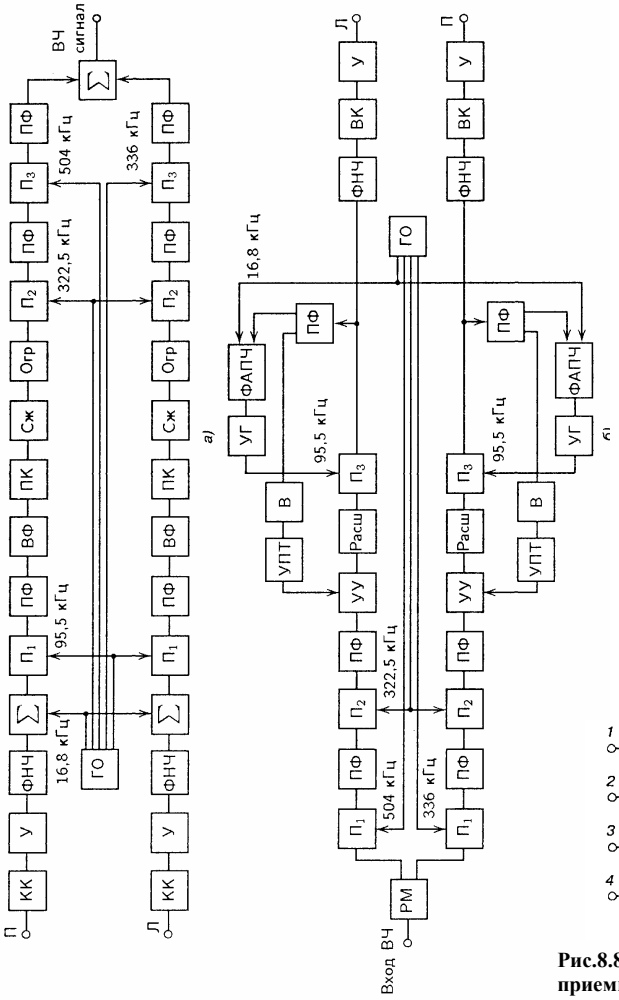


Рис.8.5. Структурная схема системы MSt-15 для канала стереофонического вещания

Число занимаемых телефонных каналов	2	3
Номера занимаемых телефонных каналов	4, 5	4, 5, 6
Занимаемая полоса частот, кГц	89,6...95,95	86,0...95,95
Ширина канала ЗЧ, Гц	50...6400	50...10000

Рис.8.6. Временная структура цикла ЦСП ИКМ-30

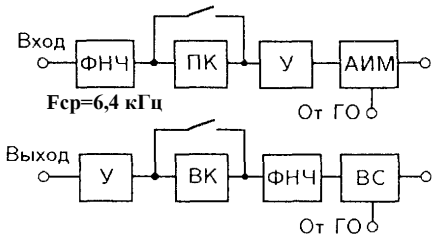


Рис.8.7. Упрощенная схема системы ИКМ-12М для организации монофонического звучания

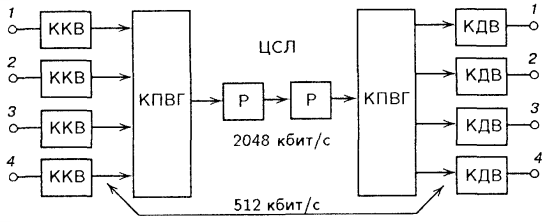


Рис.8.8 Упрощенная структурная схема передающего и приемного комплектов аппаратуры ОЦВ-480: ЦСЛ – цифровая соединительная линия; Р – регенераторы.

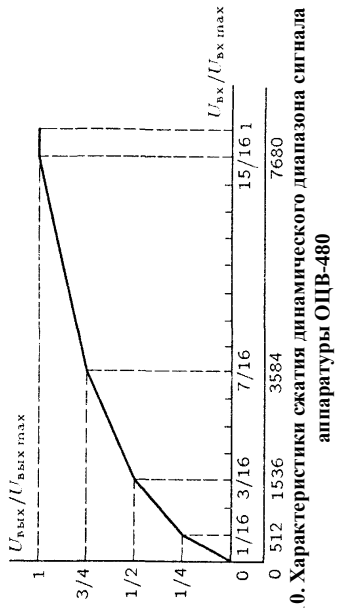


Рис.8.10. Характеристики сжатия динамического диапазона сигнала аппаратуры ОЦВ-480

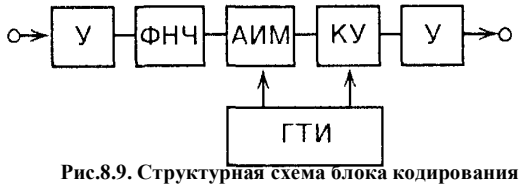


Рис.8.9. Структурная схема блока кодирования

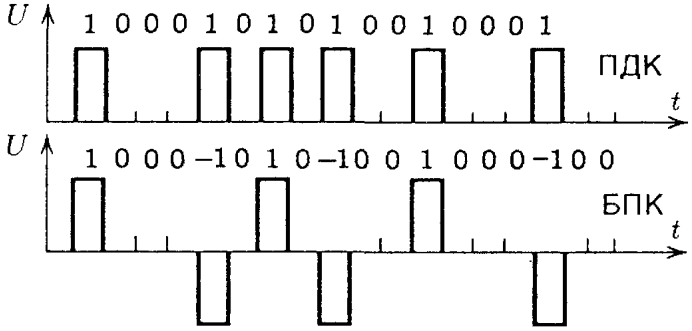


Рис.8.12. Преобразование простого двоичного кода в биполярный

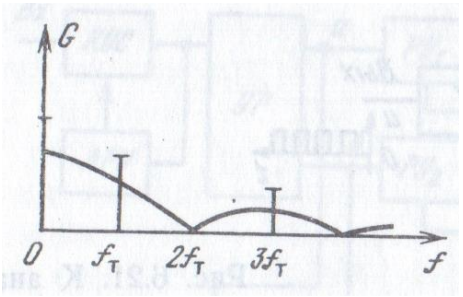


Рис.8.13. Спектр простого двоичного кода

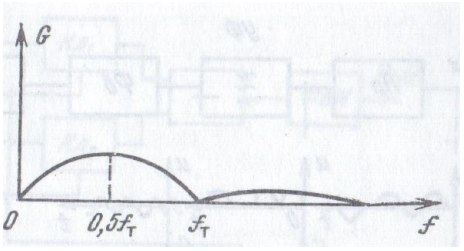


Рис.8.14. Спектр биполярного кода

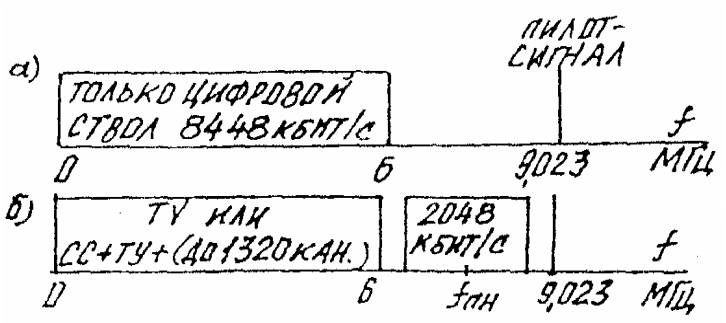


Рис.8.15. Два варианта спектра стволов РРЛ: а – полностью цифровой; *б* –аналого-цифровой

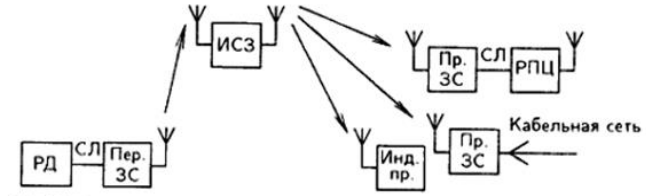


Рис. 15.18. Схема организации каналов передачи сигналов ЗВ в спутниковых системах связи: РД — радиодом; Пер. ЗС — радиопередатчик земной станции; Пр ЗС — радиоприемник земной станции; РПЦ — радиопередающий центр; Инд. пр — индивидуальные преемники

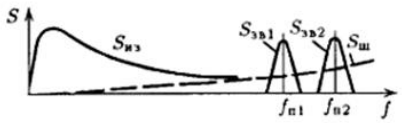


Рис. 15.19. Спектры сигналов изображения $S_{из}$, звука $S_{зв1}$, $S_{зв2}$, помех (шума) $S_ш$

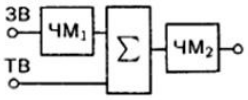


Рис. 15.20. Структурная схема формирования сигнала в системе с двойной ЧМ

Рис. 15.21. Структурная схема каналообразующей аппаратуры «Градиент-В»

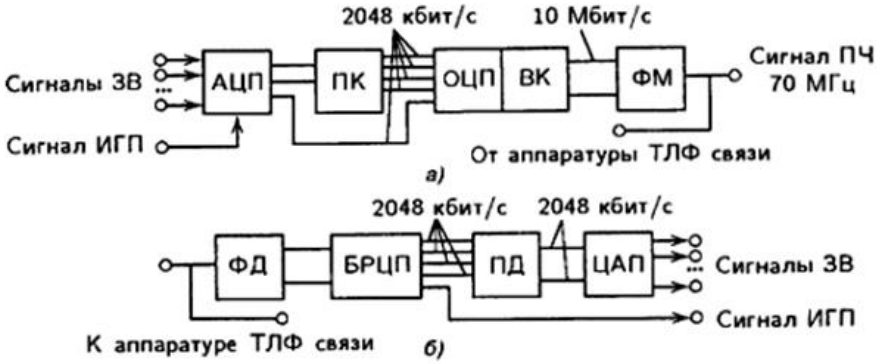


Рис. 15.22. Структурные схемы передающего (*а*) и приемного (*б*) комплектов аппаратуры «Орбита-РВ»

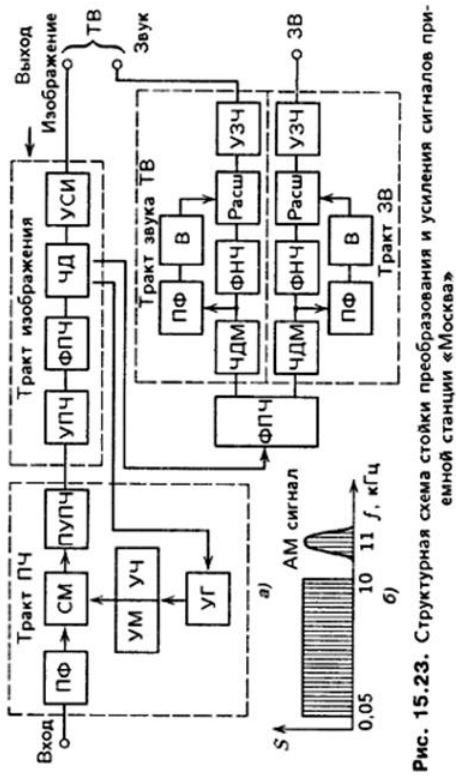


Рис. 15.23. Структурная схема стойки преобразования и усиления сигналов приемной станции «Москва»

ЛЕКЦІЯ №8 ТРАКТ ВТОРИННОГО РОЗПОДІЛУ ПРОГРАМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РАДІОМОВНИХ МЕРЕЖ

ЛІТЕРАТУРА:

- Брагин А.С. Технологии вещательных служб. Часть 1. Технологии звукового радиовещания. –К.: НТУУ «КПИ», 2006.
- Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов./Под ред. Ю. А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком., Радио и связь, 2007. – 872 с.

РОЗДАТНИЙ МАТЕРІАЛ: див. ДОДАТОК Ж

1 Смуги частот, що відведені для радіомовлення

Від трактів первинного розподілу програм мовлення останні поступають на входи трактів вторинного розподілу.

Вторинний розподіл програм звукового мовлення включає утворення трактів передачі за допомогою систем мовних радіопередавачів і приймання сигналів мовлення на побутові радіоприймачі. Таким чином, за допомогою трактів вторинного розподілу програм мовні сигнали доставляються безпосередньо до слухача. Інша гілка вторинного розподілу програм звукового мовлення (проводове мовлення), а також технології супутникового звукового мовлення тут не розглядаються.

Для служб радіомовлення з метою впорядкованого використання радіочастотного ресурсу Регламентом радіозв'язку розподілені ділянки частот в різних діапазонах хвиль (частот) для трьох світових районів (I, II і III), рис.8.1.

В свою чергу за інтенсивністю атмосферних завад земна куля умовно розділена на три зони А (з мінімальним рівнем завад 60 дБ на частоті 1 МГц ***відносно мікровольта на метр***), В (70 дБ) і С (63 дБ). Для інших частот вводяться відповідні поправки. Україна знаходиться в зоні А. Знання рівня завад необхідне для раціонального планування мережі мовних радіостанцій.

Основні смуги частот для радіомовлення розміщені в 5…8 діапазонах, табл.8.1.

Їх використання здійснювалося по мірі освоєння все більш коротких хвиль (більш високих частот). В 5…7 діапазонах **радіомовлення здійнюється з використанням амплітудної модуляції,** застосування якої в професійному радіозв'язку закінчено.

В першому світовому районі (Україна розміщена в ньому) сітка несучих частот для діапазонів кіло- і гектометрових хвиль встановлена рівною 9 кГц а частоти (кратні 9 кГц) пронумеровані. При цьому верхня частота, що модулює, повинна бути не більше 4,5 кГц.

Для **кілометрових хвиль** несуча частота 1-го каналу взята рівною 155 кГц, другого 164 кГц , останнього 15-го – 281 кГц. Для колишнього СРСР було виділено чотири частоти.

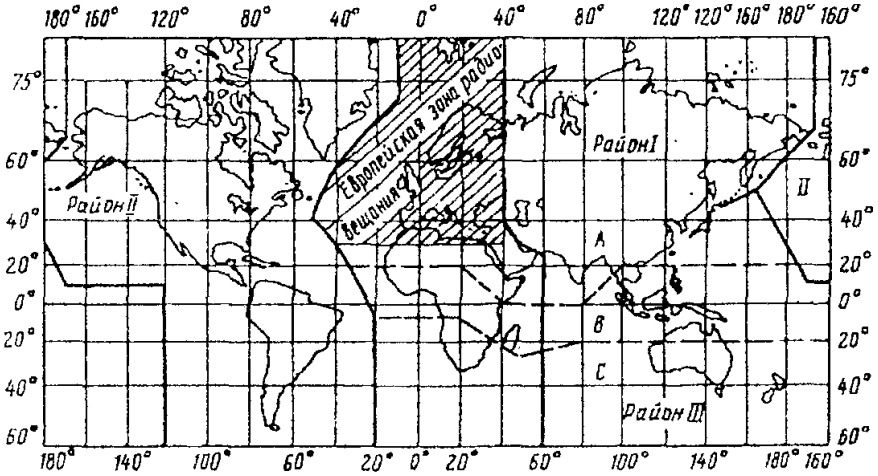


Рис.7.1. Зони розподілу частот між країнами

Таблиця 8.1. Смуги частот для радіомовлення

Номер діапазону	Назва діапазону хвиль	Довжина хвилі,м	Смуги частот , МГц
5	Кілометрові (довгі) хвилі	200…735,3	0,15…0,285
6	Гектометрові (середні) хвилі	575…187	0,525…1,605
7	Декаметрові (короткі) хвилі	90	3,2…3,640
		75	3,95…4,0
		62	4,75…4,995
		59	5,006…5,06
		49	5,95…6,2
		41	7,1…7,3
		31	9,5…9,9
		25	11,65…12,05
		23	13,6…13,8
		19	15,1…15,6
		16	17,55…17,9
		13	21,45…21,85
		11	20,67…21,1
8	Метрові хвилі	4,55…4,1	65,8…74
		3,41…2,788	88…108

Для **гектометрових хвиль** несуча частота першого мовного каналу дорівнює 531 кГц , другого 540 кГц , останнього (120-го) каналу – 1602 кГц. Таким чином, і в цьому діапазоні сітка частот має крок 9 кГц.

Необхідна ширина смуги випромінювання вибирається Адміністрацією зв’язку, виходячи із місцевих умов самостійно (при необхідності – з врахуванням прикордонної співпраці) в межах від 9 до 20 кГц (відповідно для сигналів мовлення з верхньою частотою від 4,5 до 10 кГц). В останньому випадку для

зниження взаємних завад станції мовлення, що працюють на суміжних каналах, повинні бути рознесені територіально на достатні (за умовами ЕМС) відстані. В ряді країн (Італія, США, Японія та інші) діапазон гектометрових хвиль для мовлення довгий час був основним. В найбільш дешевих приймачах передбачається лише цей діапазон (без декаметрового).

2. Особливості розповсюдження радіохвиль в діапазонах частот наземного радіомовлення

Кілометрові і гектометрові хвилі. Перша особливість діапазонів кілометрових і гектометрових хвиль полягає в тому, що вони характеризуються значними атмосферними і індустріальними завадами, оскільки останні мають підвищений у порівнянні з більш високочастотними діапазонами рівень.

Друга особливість відображає дуальний механізм розповсюдження радіохвиль (РРХ) – розповсюдження як земними хвилями, так і просторовими (що відбиваються від іонізованих шарів атмосфери на висотах більше 50 км), рис.8.2.

Кілометрові хвилі розповсюджуються якби у природному хвилеводі, слабо поглинаючись в нижніх шарах D і E і добре відбиваючись від них. Гектометрові хвилі сильніше ніж кілометрові затухають при розповсюдженні земною хвилею.

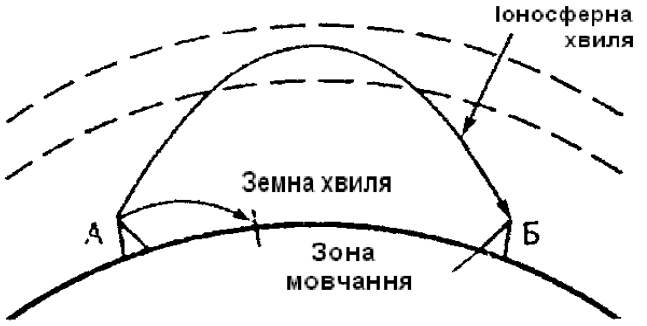


Рис.7.2. Механізми розповсюдження радіохвиль земною та іоносферною хвилею

Вдень область приймання мовних програм обмежується умовами розповсюдження земної хвилі, оскільки просторові *хвилі сильно поглинаються в шарі* **D** *іоносфери*. Міра поглинання збільшується в сторону більш коротких хвиль. Ці хвилі можуть розповсюджуватися і шляхом відбиття від шару ***E***, але лише в нічний час, коли зникає шар D (оскільки вночі сонячні промені не досягають висоти шару D).

В нічні години затухання просторових хвиль різко зменшується, і радіохвилі розповсюджуються як земні і як просторові (з відбиттям від більш високо розміщених шарів іоносфери). Саме тому, з метою послаблення завад від таких станцій на суттєво великих відстанях (що виникають при розповсюдженні іоносферною хвилею) в США, наприклад введено заборону на роботу мовних радіостанцій в нічний час.

У зв'язку з неперервними флуктуаційними змінами концентрації зарядів в іоносфері (під дією випромінювань сонця) змінюються висота відбиття хвиль і відповідно різниця фаз (в точці прийому) земної і просторової хвиль. Внаслідок їх інтерференції *спостерігаються коливання напруженості результуючого поля*, що проявляється як ***замирання***, що супроводжується викривленнями мовного сигналу. Замирання і викривлення найбільш помітні на короткохвильовій ділянці діапазону гектометрових хвиль.

У зв'язку з замираннями можна виділити наступні області:

- На близьких відстанях від мовної станції навіть уночі напруженість поля земної хвилі значно перевищує поле просторової хвилі. Напруженість поля не залежить від часу доби. Тому цю область називають ***областю впевненого приймання.***
- На значних відстанях від мовної станції в денний годину можливе впевнене приймання програм. У нічні години результуюче поле представляє собою результат накладання земної і просторової хвиль. Це – ***область ближніх замирань.***
- На великих відстанях від мовної станції в денну годину напруженість поля земної хвилі настільки мала, що приймання сигналів практично відсутнє. У нічні години в цю область можуть надходити просторові хвилі. В області ***далеких замирань*** спостерігаються замирання, що викликані розповсюдженням радіохвиль багатьма шляхами.

Для боротьби із замираннями в ближній зоні на передавальній стороні використовуються направлені (т.з. антифедингові) антени, діаграма спрямованості яких забезпечує мале випромінювання під великими кутами до горизонту, внаслідок чого зменшується інтенсивність просторової хвилі.

Антени мають коефіцієнт спрямованої дії до 20 дБ в горизонтальній площині (для земної хвилі) і до 15 дБ – у вертикальній (для просторової хвилі).

Іншим способом протидії замиранням є використання регулювання підсилення в приймачах мовних програм.

Радіомовні станції гектометрового діапазону мають потужність від 5 до 500 Вт і зону обслуговування земною хвилею до 300 км.

Декаметровий діапазон. При мовленні на декаметрових хвилях можуть використовуватися обидва механізми розповсюдження – і *земною* й *іоносферною хвилею*. Але хвилі, що розповсюджуються вздовж поверхні Землі, затухають в ній ще сильніше ніж гектометрові. Різке збільшення дальності мовлення в декаметровому діапазоні досягається при використанні механізму іоносферного розповсюдження. Іоносферні хвилі слабо поглинаються нижніми шарами іоносфери D і E і добрі відбиваються її верхнім шаром F_2. Чим вище шар, що відбиває радіохвилі , тим більша дальність мовлення.

Даний діапазон використовується переважно для міжнародного мовлення на відстані до декількох тисяч км. (лише в країнах з великою територією мовлення ведеться у віддалені райони). Всередині країни мовлення на декаметрових хвилях ведеться дуже рідко, хоча і виділені ділянки частот для мовлення. Земна хвиля

внаслідок сильного її поглинання в грунті здатна розповсюджуватися лише на декілька десятків кілометрів в межах прямої видимості (в залежності від висоти передавальної антени і потужності передавача).

При великих відстанях використовується механізм іоносферного розповсюдження радіохвиль з відбиттям від одного до 2..3 стрибків (останнє – рідко). Максимальна довжина одного стрибка (по поверхні Землі - близько 3000 – 4000 км).

Потужності передавачів мовних станцій в декаметровому діапазоні мають декілька градацій – 50, 100, 150, 250 і 500 кВт.

Оскільки при радіомовленні в декаметровому діапазоні зона обслуговування знаходиться від передавача на тисячі кілометрів, для ефективного випромінювання енергії в цю зону відкривається можливість використання направлених антен з коефіцієнтами підсилення до 20 дБ (по потужності – до 80 разів) Разом з направленими властивостями передавальних антен мовні станції можуть працювати з ефективно випромінюваними потужностями, що вимірюються десятками мегават. Нагадаємо, що ефективно випромінюваною потужністю називається добуток величини потужності, що надходить до антени і коефіцієнта підсилення передавальної антени.

Суттєвим недоліком декаметрового діапазону є сильна рухомість шарів іоносфери: висота розміщення шарів, їх товщина і концентрація іонів у них сильно залежить від години доби, пори року, спорадичних сонячних спалахів і 11 – літнього періоду сонячної активності. Тому при організації мовлення для кожного із сезонів складається свій частотний (хвильовий) розклад мовлення на основі прогнозів іоносферної служби.

Умови розповсюдження радіохвиль прийнято прогнозувати на кожний сезон. Рік ділиться на чотири сезони: листопад – лютий, березень – квітень, травень – серпень, вересень – жовтень. Для кожного сезону складається частотний план, в якому у відповідності із індексом сонячної активності (число Вольфа) прогнози складаються для будь-якого з місяців. Хвильовий (частотний) розклад з врахуванням умов, що прогнозуються, складається для всього сезону. Однак часта зміна частот мовлення може суттєво відрізнятися від так званих оптимальних робочих частот (ОРЧ), що зменшує напруженість поля і погіршує якість приймання в зоні обслуговування.

Крім того, відповідно до умов приймання іоносферних хвиль мовний діапазон прийнято ділити на денні, проміжні (25…35 м) і нічні хвилі. Вдень можлие приймання сигналів від станції на хвилях довжиною 10..25 м.

На інших хвилях рівень сигналу недостатній для приймання. У нічну годину достатній рівень сигналу спостерігається від мовних станцій, що працюють в інтервалі довжин хвиль 35…70 м.

Внаслідок непостійності умов РРХ в точки приймання надходить декілька променів, що відбилися від іоносфери на різних висотах і отримали різне число відбивань від поверхні Землі. Інтерференція цих променів призводить до того, що приймання супроводжується замираннями сигналу. Замирання носять випадковий

характер і бувають швидкими і повільними. При цьому напруженість поля змінюється в десятки і навіть сотні разів, іноді аж до повного зникнення мовного сигналу в точці приймання в окремі моменти часу.

Поширеним способом підвищення надійності і якості прийому є радіомовлення в одну зону декількома передавачами, що працюють одночасно на різних частотах (іноді на трьох – чотирьох). Відмітимо, що під ***надійністю радіомовлення*** *в даному випадку розуміють відношення проміжку часу якісного приймання мовних сигналів до загального часу мовлення (наприклад, на протязі доби, місяця, сезону) при умові відсутності відмов технічних засобів.*

Мовлення на чотирьох робочих частотах забезпечує надійність якісного приймання програм мовлення до **95 %**. Використання чотирьох частот на трасі з двома стрибками знижує ймовірність якісного прийому до **85 %**, а на трасі з трьома стрибками – до **70 %**.

У декаметровому діапазоні ширина смуги спектру випромінювання (класу **A3E**) встановлена рівною **9** кГц. Це означає, що верхня частота мовного сигналу складає **4,5** кГц (тому такі канали іноді називають репортерськими). Нижня частота модулюючого сигналу мовлення узята рівною **150** Гц; для частот нижче 150 Гц вводиться затухання 6 дБ/октаву.

Номінали несучих частот повинні бути кратними **5** кГц, а рознесення несучих частот – **10** кГц. При рознесенні мовних радіостанцій в просторі допускається рознесення несучих частот, що дорівнює **5** кГц.

При сильних замираннях сигналу, крім зниження рівня, відбувається порушення лінійності модуляції, тобто випадкові викривлення, як лінійні, так і нелінійні (без доведення; ще недостатньо вивчено). Знайдено що нелінійні викривлення суттєво зменшуються, якщо замість амплітудної модуляції використовувати односмугові сигнали мовлення. Крім покращення якості приймання робота односмуговими мовними сигналами дозволяє вдвічі збільшити число каналів мовлення.

Саме цими міркуваннями керувалась міжнародна спільнота при прийомі Рекомендації про переведення до 2015 р мовлення в декаметровому діапазоні на односмугові сигнали. З 1987 до 2015 р намічено здійснити цей перехід поступово, забезпечивши випуск нових мовних приймачів з синхронними демодуляторами. Для перехідного періоду рекомендується використовувати мовлення на одній бічній смузі з послабленою (на 6 дБ) несучою (випромінювання **R3E**). Приймання таких передач може здійснюватися як звичайним амплітудним, так і синхронними демодуляторами. Приймання на звичайний мовний приймач показав задовільну якість.

Кутова аналогова модуляція в декаметровому діапазоні не використовується по двом причинах:

- внаслідок недостатньої частотної сумісності (оскільки радіосигнали мовлення з кутовою модуляцією вимагають суттєво ширшої смуги частот).
- внаслідок селективних замирань, що обумовлені великою кількістю шляхів розповсюдження радіохвиль і які проявляються у вигляді провалів в спектрі

сигналу (АЧХ середовища розповсюдження радіохвиль не є «гладкою» для всіх складових спектру радіосигналу).

Згадана вище рекомендація про перехід на односмугові мовні радіосигнали крім економічного використання частотного ресурсу знижує ймовірність прояву селективних замирань.

У метровому діапазоні частот можливо радіомовлення лише земними хвилями, оскільки просторові хвилі не відбиваються від шарів іоносфери (атмосфера для радіохвиль цього діапазону «прозора»).

Виділені для радіомовлення частотні смуги використовуються для мовлення випромінюваннями з кутовою модуляцією.

Кутова модуляція має кращу (в порівнянні з амплітудною) завадостійкість і має більше ефективне використання потужності мовного передавача (більш високий коефіцієнт корисної дії). Крім того, використання кутової модуляції дозволяє збільшити відношення сигнал/завада в порівнянні з амплітудною модуляцією на **15** дБ (приблизно в 5,8 разів) при монофонічному мовленні і **5,5** дБ при стереофонічному. І ще: у цьому діапазоні суттєво нижчий рівень атмосферних і промислових завад, ніж в попередніх діапазонах. Лише даний вид модуляції в метровому діапазоні дозволяє здійснити приймання високоякісних аналогових мовних сигналів.

Максимальна девіація частоти в передавачі (згідно з Рекомендаціями (МСЕ-Р.450) може бути обрана **50** і **75** кГц. У східно-європейських країнах вона була обрана рівною 50 кГц (при цьому необхідна смуга спектру частот випромінювання складає близько **180** кГц), а в західно-європейських країнах, США, Канаді, Латинській Америці – **75** кГц (при смузі частот, що використовується, більше ніж **210** кГц).

Рознесення несучих частот кратне 30 кГц і може дорівнювати 30, 60, 90, 120,...кГц. У багатьох країнах світу смуги **66…74** МГц і **88…108** МГц використовуються для високоякісного моно- і стереофонічного радіомовлення (зі спектром модулюючих частот від 30 Гц до 15 кГц). Ділянка радіоспектру **100…108** МГц використовується переважно для організації стереофонічного радіомовлення. У цьому ж діапазоні працюють передавачі телевізійних програм (**47…66** МГц – 1-й і 2-й TV канали; **76…100** МГц – 3-й...5-й канали; **174… 230** МГц – 6-й...12-й канали; **470… .960** МГц – 23- й і наступні канали).

Станції мовлення даного діапазону служать для організації високоякісного звукового і телевізійного мовлення у великих містах, для обласного мовлення на території з високою густиною населення і обладнуються передавачами потужністю від 2 до 15 кВт (у великих містах – потужність більша). Сигнали від цих станцій можуть подаватися в сільські мережі проводового мовлення.

У мегаполісах встановилася цілком зрозуміла тенденція (з метою більш раціонального використання частотного ресурсу) використання кабельного телебачення замість “ефірного” і кабельного багатопрограмного стереофонічного перспективного цифрового мовлення.

3. Загальні відомості про планування мережі мовних радіостанцій (рос.мовою)

3.1 Загальні відомості про побудову передавальної мережі радіомовлення

Передающая сеть радиовещания — это совокупность технических средств (радиопередающие устройства, антенно-фидерные устройства и др.), предназначенных для генерации *электромагнитных полей (ЭМП)* определенного вида, посредством которых передаются сигналы звукового вещания. Таким способом осуществляется вторичное распределение программ звукового вещания, т.е. доведение их до радиоприемных устройств слушателей.

Передающие сети радиовещания создают для обслуживания населения, находящегося на определенной территории. При планировании такой сети определяют: диапазон частот (волн), необходимые размеры зоны обслуживания, места расположения РВС и параметры входящих в нее устройств, экономические характеристики и др. Цель планирования сети радиовещания — обеспечение требуемого качества приема радиосигналов на заданной территории при минимальных финансовых затратах.

В состав РВС входят, в частности, радиопередающее устройство и антенно-фидерное устройство (для краткости будем их называть *передатчик* и *передающая антенна*). Каждая РВС обслуживает определенную зону.

Зоной обслуживания называют часть земной поверхности, в пределах которой минимальная создаваемая РВС *полезная напряженность ЭМП* ($E_{\text{пол}}$) достаточна для приема радиосигналов с требуемым качеством и вероятностью, не ниже заданной, при наличии помех. Величина $E_{\text{пол}}$ принимается в качестве исходной при планировании сети. Зоны обслуживания ограничены замкнутыми кривыми линиями. Величина $E_{\text{пол}}$ определяется заданным отношением напряжения звукового сигнала $U_{\text{с}}$ к среднеквадратичному напряжению помехи $U_{\text{п}}$, измеренным на выходе усилителя сигналов звуковой частоты (УСЗЧ) радиоприемника.

Отношение $U_с/U_п$ называют *защитным отношением по звуковой частоте*. Его определяют методом субъективно-статистических экспертиз. Типичное значения $U_с/U_п = 10...100$ (20...40 дБ).

Минимальной используемой напряженностью ЭМП называют такую величину E_{min}, при которой обеспечивается требуемое качество приема при наличии атмосферных и индустриальных помех, а также внутренних шумов радиоприемника.

Используемой напряженностью ЭМП называют такую величину $E_{исп}$, при которой обеспечивается требуемое качество приема при наличии указанных выше мешающих факторов, а кроме того, при воздействии помех от других РВС.

С учетом всех видов мешающих факторов на границе зоны обслуживания должны выполнятся соотношения:

$$E_{пол} \geqslant E_{исп}; \quad E_{пол} \geqslant E_{min}. \tag{16.1}$$

Большое значение при планировании сетей радиовещания имеет *защитное отношение по радиочастоте* $A_{рч}$, которое представляет собой отношение уровней сигнала и помехи на радиочастотном входе приемника, при котором защитное отношение по звуковой частоте равно заданному значению. Величину $A_{рч}$ можно определить из выражения

$$A_{рч} = 20 \lg(E_{пол}/E_{меш}), \tag{16.2}$$

где $E_{меш}$ — напряженность ЭМП помехи, создаваемой мешающей РВС в точке приема сигнала полезной РВС на границе зоны обслуживания.

Отношение $A'_{рч} = E_{пол}/E_{меш} = 10^{A_{рч}/20}$ показывает, во сколько раз напряженность ЭМП сигнала, создаваемая полезной РВС на границе зоны обслуживания, должна превышать соответствующую величину помехи, источником которой является мешающая РВС, для обеспечения приема сигнала с требуемым качеством.

От защитного отношения по радиочастоте существенным образом зависит площадь и конфигурация зоны обслуживания.

Требуемые защитные отношения по звуковой и радиочастоте указывают при заданных параметрах системы радиовещания: виде модуляции, коэффициенте модуляции, ширине полосы частот, занимаемых радиоканалом, разносе несущих частот и др.

Действующее значение напряженности ЭМП, мВ/м, можно определить по формуле [2]

$$E = F(173\sqrt{PG})/r, \tag{16.3}$$

где P — мощность передатчика, кВт; G — коэффициент усиления передающей антенны в направлении точки приема относительно элементарного диполя, дБ, (произведение PG называют эффективной мощностью излучения — P_Σ); r — расстояние между передающей и приемной антеннами, км; F — показатель ослабления, зависящей от длины волны λ и удельной проводимости почвы σ.

В общем случае значения напряженности ЭМП, создаваемого РВС, на достаточно больших удалениях от передающей антенны можно рассматривать как случайную функцию, зависящую от времени. Для оценки характеристик ЭМП используют параметр T — относительное время превышения заданной напряженности ЭМП, выраженной в процентах, которая может быть определена как отношение суммарного времени превышения этой величины $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \ldots$ к длительности времени приема T_0, т.е. $T = (\Delta t / T_0) \cdot 100$ % (рис. 16.2).

Более точно определить значение напряженности ЭМП можно, используя графики (рис. 16.3 и 16.4), которые построены на основе экспериментальных исследований и опубликованы в документах Междуна-

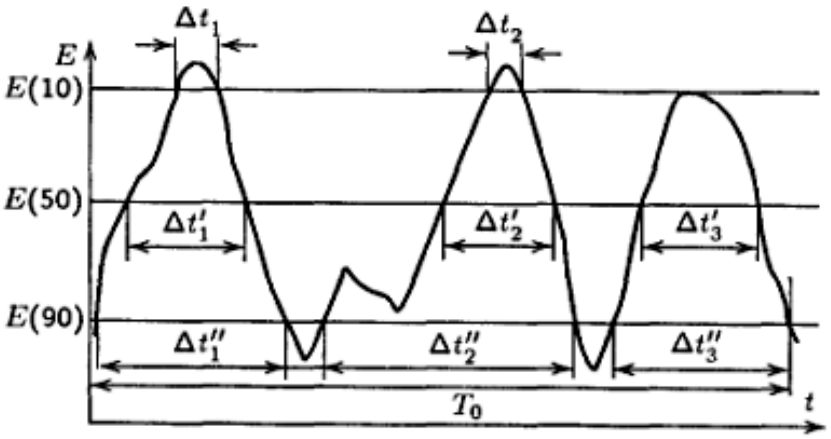


Рис. 16.2. Диаграммы, иллюстрирующие определение относительного времени превышения заданного уровня напряженности ЭМП T, %

родного консультативного комитета по радио (МККР) [23–25] (в 1992 г. МККР был преобразован в сектор радиосвязи Международного союза электросвязи — МСЭ-Р).

Величина напряженности ЭМП, превышаемая в T % времени, обозначается через $E(T)$. Значение напряженности ЭМП, превышаемое в течение 50 % длительности приема ($T = 50$ %), $E(T) = E(50)$ называют медианным.

Кроме того, напряженность ЭМП, создаваемая вокруг передающей антенны на определенном расстоянии r от нее, зависит от места установки радиоприемника и может изменяться при его перемещении. Для оценки данной характеристики используют параметр L, %, который обо-

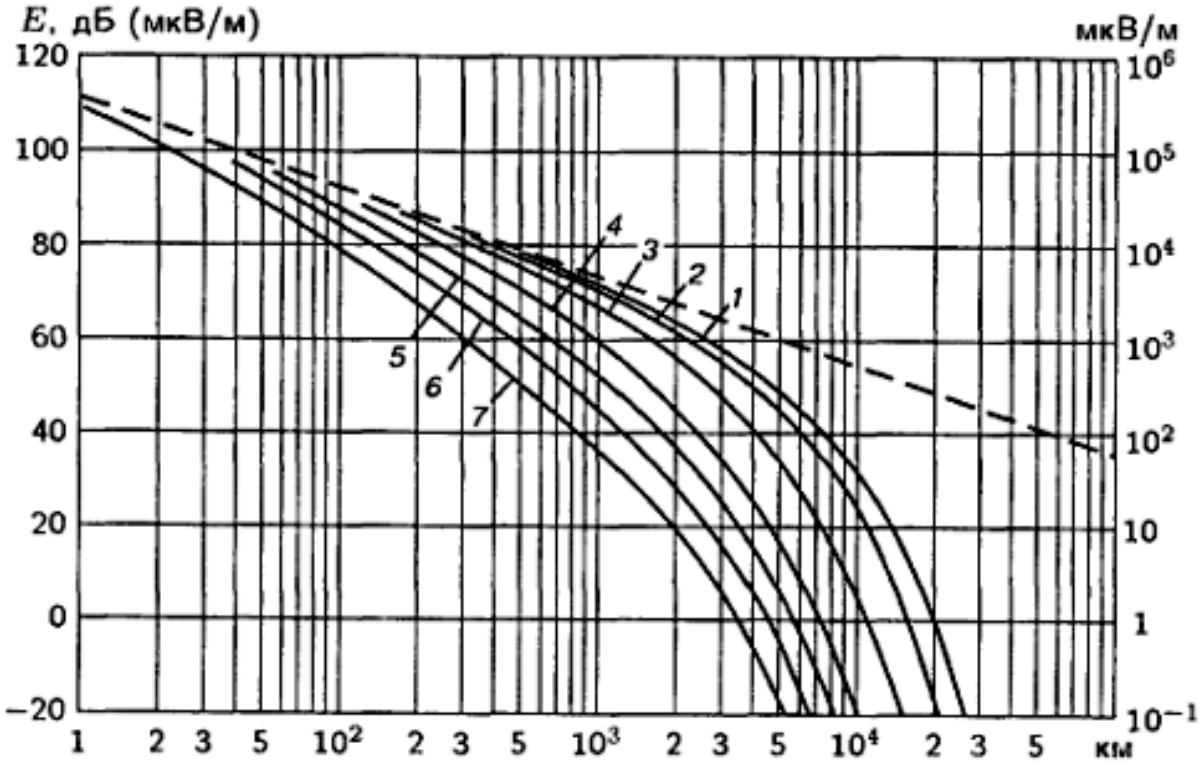


Рис. 16.3. Зависимости изменения напряженности поля от расстояния и частоты для $P_\Sigma = 1$ кВт; $\sigma = 3 \cdot 10^{-3}$ См/с, $\varepsilon = 4$ (кривые МККР): *1* — 150 кГц (2000 м); *2* — 200 кГц (1500 м); *3* — 300 кГц (1000 м); *4* — 500 кГц (600 м); *5* — 700 кГц (429 м); *6* — 1 МГц (300 м); *7* — 1,5 МГц (200 м)

значает количество мест приема, в которых напряженность ЭМП превышает заданный уровень. Количество мест приема в общем случае бесконечно велико, поэтому здесь подразумевается, что места (точки) приема выбираются с определенной дискретностью. Величину напряженности ЭМП, превышаемую в L % мест приема, обозначают через $E(L)$. Например, $E(50)$ в данном случае — это значение напряженности ЭМП, превышаемое в 50 % мест приема.

Таким образом, напряженность рассматриваемого ЭМП, которая зависит от времени и места проведения измерения, представляет собой двумерную случайную величину. Значение напряженности ЭМП $E(r, T, L)$, которое в T % времени превышается в L % мест приема на расстоянии r от передающей антенны, может быть определено по следующему выражению [1, 3]:

$$E(r, T, L) = P_\Sigma + E(r, 50, 50) + R(T) + R(L), \qquad (16.4)$$

где P_Σ — эффективная мощность излучения передатчика, дБ (кВт); $E(r, 50, 50)$ — медианное значение напряженности ЭМП, дБ (мкВ/м), которое превышается в течение $T = 50$ % времени и $L = 50$ % мест приема на расстоянии r от передатчика при эффективной мощности излучения $P_\Sigma = 1$ кВт; $R(L)$ — функция, которая учитывает стати-

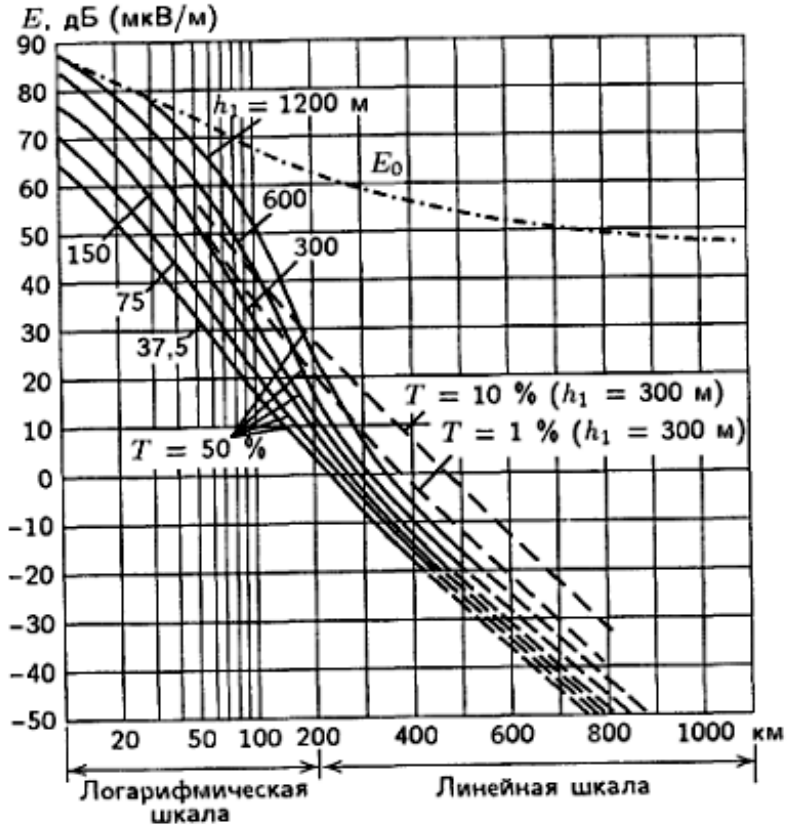


Рис. 16.4. Зависимости изменения напряженности электромагнитного поля от расстояния и высоты передающей антенны для диапазона частот 30...250 МГц, $P_\Sigma = 1$ кВт, $L = 50$ % (кривые МККР)

стическое распределение напряженности ЭМП в различных местах приема на заданном расстоянии r; $R(T)$ — функция, учитывающая статистическое распределение напряженности ЭМП во времени на заданном расстоянии r.

Если полезная и мешающая РВС работают одновременно, то на границе зоны обслуживания должны выполняться соотношения

$$E_{\text{пол}} - E_{\text{меш}} = A_{\text{рч}} \text{ и } E_{\text{пол}} \geqslant E_{\min}, \qquad (16.5)$$

где $E_{\text{пол}}$, $E_{\text{меш}}$, $E_{\min}$ выражаются в дБ (мкВ/м); $A_{\text{рч}}$ — в децибелах. В радиовещании величину $A_{\text{рч}}$ принято оценивать для $T = 50$ %.

Уровни помех, создаваемых мешающей РВС, зависят от ряда факторов, например, состояния тропосферы, ионосферы, рельефа местности, времени года, суток и др. Поэтому существует норма на длительность времени, %, в течение которого влияние помех заметно для радиослушателей и условие $E_{\text{пол}} - E_{\text{меш}} = A_{\text{рч}}$ не выполняется. В соответствии с рекомендациями МККР в зоне обслуживания РВС в диапазоне МВ (УКВ) напряженность создаваемого ею ЭМП должна обеспечивать прием с требуемым качеством при использовании массовой радиоприемной

аппаратуры в $L = 50$ % мест приема и в течение $T = 90$ % времени для монофонического и $T = 99$ % для стереофонического вещания. Таким образом, допускается появление заметных на слух помех в течение 10 и 1 % времени соответственно. Из (16.2)–(16.5) можно получить уравнения (16.6) и (16.6а), по которым можно выполнять расчеты, связанные с определением характеристик зон обслуживания РВС:

$$P_{\Sigma\text{пол}} + E_{\text{пол}}(r_{\text{пол}}, 50, 50) + R(T) + R(L) = E_{\min}; \tag{16.6}$$

$$P_{\Sigma\text{пол}} - P_{\Sigma\text{меш}} + E_{\text{пол}}(r_{\text{пол}}, 50, 50) - E_{\text{меш}}(r_{\text{меш}}, 50, 50) + K(T) + K(L) = A_{\text{рч}}, \tag{16.6а}$$

где $E_{\text{пол}}(r_{\text{пол}}, 50, 50)$ — медианное значение напряженности ЭМП полезной РВС на расстоянии $r_{\text{пол}}$ до точки на границе зоны обслуживания; $E_{\text{меш}}(r_{\text{меш}}, 50, 50)$ — медианное значение напряженности ЭМП помех от мешающей РВС на расстоянии $r_{\text{меш}}$ до той же точки на границе зоны обслуживания. Величины $K(T)$ и $K(L)$ определяют из следующих выражений [1, 3]:

$$K(T) = \sqrt{R^2_{\text{пол}}(T) + R^2_{\text{меш}}(T)};$$
$$K(L) = \sqrt{R^2_{\text{пол}}(L) + R^2_{\text{меш}}(L)}. \tag{16.7}$$

В некоторых случаях выражение (16.4) может быть упрощено. Например, при приеме радиосигнала, передаваемого посредством *земной волны* (т.е. электромагнитной волны, которая распространяется вдоль земной поверхности), в диапазонах ДВ, СВ напряженность ЭМП в точке приема изменяется во времени пренебрежимо мало. Изменениями напряженности ЭМП, обусловленными рельефом местности, непостоянством величины проводимости почвы, в этом случае также пренебрегают. Тогда формулу (16.4) можно преобразовать следующим образом:

$$E_{\text{пол}}(r_{\text{пол}}, T, L) = E_{\text{пол}}(r_{\text{пол}}) + P_{\Sigma}. \tag{16.8}$$

Значения $E_{\text{пол}}(r_{\text{пол}})$ удобно определить по графикам, представленным на рис. 16.3 и 16.4.

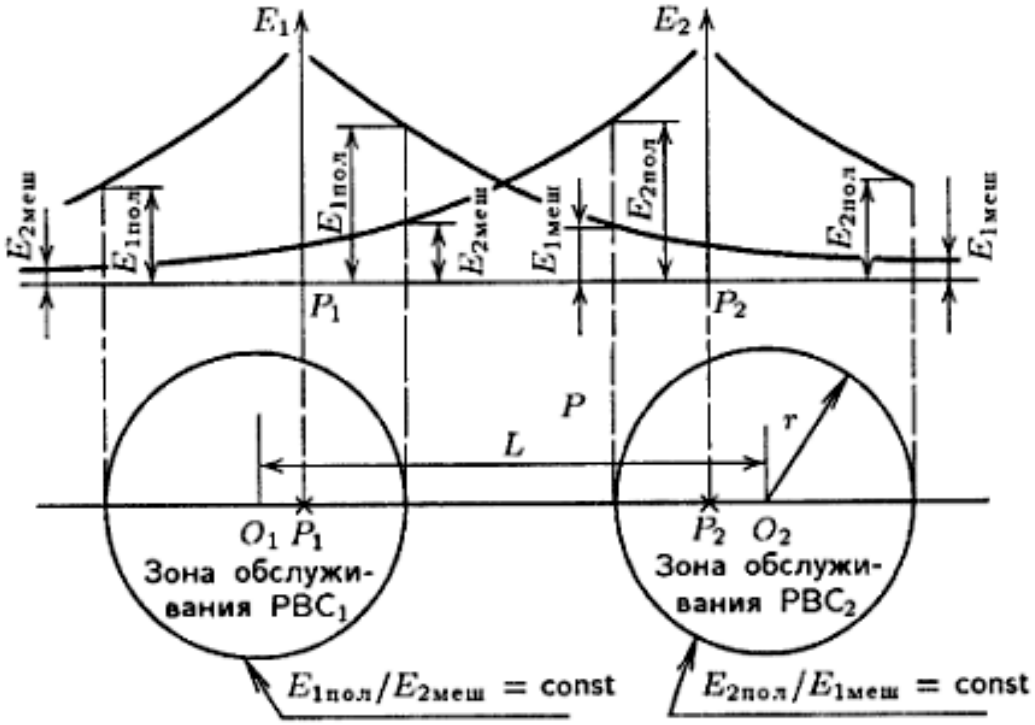


Рис. 16.5. Зависимость изменения напряженности электромагнитного поля при наличии двух передатчиков в точках P_1 и P_2 и их зоны обслуживания

При отсутствии помех от других РВС, использовании передающих антенн с круговыми диаграммами направленности в горизонтальной плоскости и в условиях равнинной местности зона обслуживания приблизительно имеет форму круга. Выражение (16.8) позволяет определить радиус зоны обслуживания r для указанных условий. При воздействии помех от других РВС площадь зоны обслуживания уменьшается в зависимости от защитного отношения по радиочастоте $A_{рч}$. Чем больше $A_{рч}$, тем меньше площадь зоны обслуживания полезной РВС и больше площадь зоны, в которой возможны искажения полезного сигнала (рис. 16.5). Защитное отношение $A_{рч}$ зависит от характера помех, создаваемых мешающими РВС. Возможны следующие варианты одновременной работы различных РВС: в совмещенном частотном канале (значения несущих частот одинаковы, программы, передаваемые РВС, различны); в синхронной (одночастотной) сети (значения несущих частот одинаковы, программы, передаваемые РВС, также одинаковы); в различных частотных каналах. Для каждого из этих случаев определяют свое значение защитного отношения $A_{рч}$. Наибольшее значение $A_{рч}$ соответствует работе РВС, передающих различные программы, в совмещенном частотном канале. Если РВС работают в разных частотных каналах и разнос между несущими частотами равен или превышает

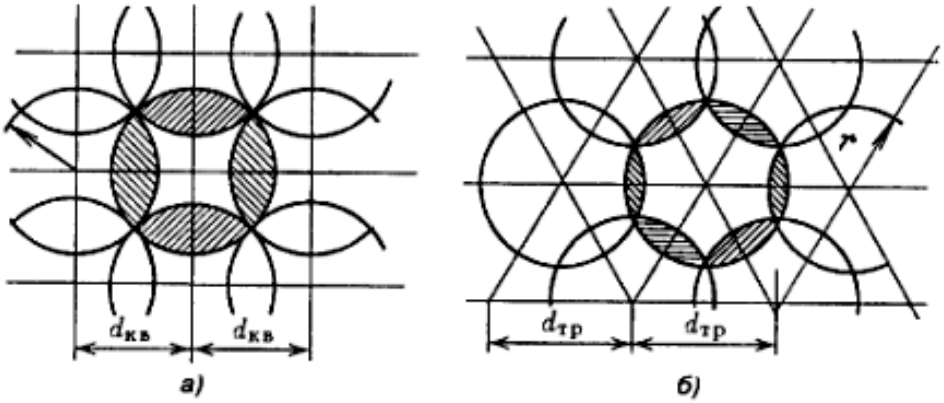


Рис. 16.6. Схемы размещения передатчиков

удвоенное значение ширины спектра наиболее широкополосного радиосигнала, то влиянием этих РВС друг на друга можно пренебречь.

Планирование сети радиовещания включает в себя решение задач по размещению РВС и распределению частот между ними с таким расчетом, чтобы обеспечить прием радиосигналов с требуемым качеством для максимального количества радиослушателей при минимальных затратах финансовых средств. Если необходимо равномерное размещение РВС на обслуживаемой территории, то применяют квадратную или треугольную сетку. В первом случае передатчики РВС с оптимальной эффективной излучаемой мощностью $P_{\Sigma опт}$ и оптимальным радиусом зоны обслуживания $r_{опт}$ устанавливают в вершинах квадратов, а во втором — в вершинах равносторонних треугольников (рис. 16.6). В случае применения квадратной сетки минимальное расстояние между РВС $d_{кв\,min} = \sqrt{2}r_{опт}$, площадь зоны обслуживания $S_{кв} = 2r_{опт}^2$. При использовании треугольной сетки минимальное расстояние между передатчиками РВС $d_{тр\,min} = \sqrt{3}r_{опт}$, а $S_{тр} = 2{,}6r_{опт}^2$. Таким образом, при заданной площади зоны обслуживания отношение количеств РВС $n_{кв}$ и $n_{тр}$ при указанных вариантах их размещения равно $n_{кв}/n_{тр} = S_{тр}/S_{кв} = 1{,}3$, т.е. треугольная сетка обеспечивает большую экономическую эффективность. Однако идеализированные схемы размещения РВС не всегда пригодны для практического применения. Например, РВС, как правило, устанавливаются вблизи крупных городов или в других районах, где высока плотность населения.

3.2 Побудова передавальної мережі радіомовлення кілометрового та гектометрового діапазонів хвиль

Определение линейных размеров, площади и конфигурации зоны обслуживания РВС, входящей в состав сети, требует учета мешающего воздействия всех других РВС, работающих в совмещенных, соседних и, при необходимости, более отдаленных частотных каналах.

Значение используемой напряженности ЭМП на границе зоны обслуживания данной РВС при наличии других РВС, осуществляющих передачу сигналов в совмещенном канале, можно определить по формуле [1, 3]

$$E_{\text{исп}} = \sqrt{\sum_i (a_i E_{\text{мешi}})^2 + \sum_l (a_l E_{\text{мешl}})^2 + E_{\min}^2}, \qquad (16.9)$$

где $E_{\text{мешi}}$ — напряженность ЭМП i-й мешающей РВС, которая работает в совмещенном частотном канале, мВ/м; $E_{\text{мешl}}$ — напряженность ЭМП ℓ-й мешающей РВС, работающей в синхронной сети с данной РВС, мВ/м; $E_{\min}$— минимальная напряженность ЭМП, планируемая для данного диапазона частот, мВ/м. $a_i = 10^{A_i/20}$; $a_l = 10^{A_l/20}$; A_i, A_l — защитные отношения по радиочастоте, относящиеся к РВС с номерами i и l соответственно, дБ

Границы зоны обслуживания изменяются в зависимости от времени суток. В светлое время суток сигнал распространяется за счет земной волны, а влияние пространственной волны пренебрежимо мало. В темное время за счет лучшего прохождения пространственных волн возра-

Таблица 16.4

Диапазон волн	Условия приема	$E_{\min}$, дБ, относительно 1 мкВ/м
Средние волны (СВ)	Земная волна, светлое время суток, зона обслуживания ограничена атмосферными помехами	60
	Земная волна, светлое время суток, имеются помехи от других РВС	63
	Земная волна, темное время суток. Прием осуществляется в сельской местности (имеются атмосферные помехи)	71
	Земная волна, темное время суток. Прием осуществляется в городских условиях (имеются промышленные помехи)	77
Длинные волны (ДВ)	Независимо от условий приема	77

стают уровни помех от удаленных РВС. При этом площадь зоны обслуживания полезной РВС сокращается (рис. 16.7).

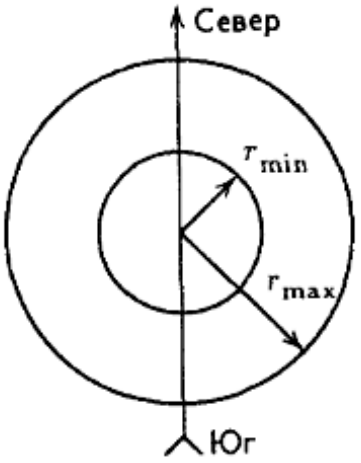


Рис. 16.7. Зоны обслуживания передатчика в дневное (большая площадь) и ночное (меньшая площадь) время

Для расчета передающей сети радиовещания, которая состоит из РВС ДВ или СВ диапазонов, можно использовать следующий алгоритм [2].

1. Определяют местоположения и характеристики передатчиков, которые создают помехи рассматриваемой РВС. Устанавливают защитные отношения для каждого мешающего передатчика.

2. За исходное принимают направление на север (по меридиану) от места расположения передатчика полезной РВС. На расстоянии r_0 от данного передатчика на указанном меридиане отмечают точку и определяют ее географические координаты: широту φ_0 и долготу L_0.

3. По известным географическим координатам всех передатчиков, которые создают помехи, используя формулы сферической геометрии, определяют расстояния от каждого передатчика до выбранной точки.

4. По кривым распространения ЭМП (см. рис. 16.3) определяют напряженности ЭМП помех, создаваемых мешающими передатчиками E

5. Зная значение $E_{\min}$ минимально допустимой напряженности ЭМП, создаваемого полезной РВС, по формуле (16.9) рассчитывают необходимое значение используемой напряженности ЭМП полезного сигнала $E_{\text{исп}}$.

6. По графикам (16.3) находят напряженность ЭМП $E'_{\text{исп}}$, создаваемую полезной РВС в выбранной точке r_0 (с координатами φ_0 и L_0), и сравнивают ее с рассчитанным значением $E_{\text{исп}}$. Если $\Delta E = E'_{\text{исп}} - E_{\text{исп}} = 0$, то расчет завершают и считают, что граница зоны обслуживания в выбранном направлении находится на расстоянии r_0 от полезной РВС. Если $\Delta E > 0$, то расчет повторяют, увеличивая расстояние от полезной РВС до исследуемых точек. Если $\Delta E < 0$, то расчет повторяют, уменьшая указанное расстояние. Расчет завершают при смене знака ΔE. Затем, выполнив интерполяцию для нескольких последних вычислительных значений ΔE, находят расстояние r_0, при котором $\Delta E \approx 0$.

Дискретно изменяя направление от полезной РВС до исследуемых точек приема на величину $\Delta\psi$, повторяют расчеты и определяют местоположение точек, для которых $\Delta E \approx 0$. Соединяя эти точки плавной кривой линией, определяют конфигурацию зоны обслуживания. Количество направлений, для которых производят расчеты, обычно выбирают в пределах от 6 до 12, при этом $\Delta\psi$ варьируется от $2\pi/6$ до $2\pi/12$.

При планировании сетей радиовещания подобные расчеты выполняют для каждой РВС.

3.2 Побудова передавальної мережі радіомовлення метрового діапазону хвиль

Минимальная используемая напряженность ЭМП в диапазоне МВ ($E_{\min}$) для сельской местности ограничена в основном собственными шумами радиоприемниками и космическими шумами. В этой местности нормируется значение $E_{\min} = 48$ дБ (мкВ/м) и $E_{\min} = 54$ дБ (мкВ/м) для монофонического и стереофонического радиовещания соответственно. В городских условиях возрастают уровни помех от промышленного, учрежденческого и бытового оборудования, поэтому нормы на $E_{\min}$ несколько выше — $E_{\min} = 60...75$ дБ (мкВ/м).

Необходимо также учитывать ослабление ЭМП в городах, обусловленное большим количеством зданий и других строений с металлическими конструкциями, проводов разного назначения и т.д. Значительное ослабление ЭМП данного диапазона наблюдается внутри зданий, особенно железобетонных.

Кроме того, радиоволны диапазона МВ обладают свойством отражаться от препятствий (строений, транспортных средств, естественных возвышенностей и др.). Поэтому в приемную антенну пользователя обычно поступают, кроме основного, и ряд отраженных сигналов. Многолучевое распространение сигналов нередко приводит к появлению специфических искажений при стереоприеме. Особенно заметен этот эффект при прослушивании стереофонических программ в автомобиле, движущемся в районах с многоэтажной застройкой. В условиях стационарного приема данный эффект можно несколько ослабить, применяя внешнюю направленную антенну (например, типа «волновой канал»). Очевидно, однако, что этот способ непригоден для улучшения качества приема в подвижных объектах.

Специфика распространения радиоволн метрового диапазона состоит в том, что пространственная волна почти не отражается от ионосферы и уверенный прием возможен на расстоянии, немногим превышающем расстояние прямой видимости между передающей и приемной антеннами.

С учетом эффектов дифракции (огибания сферической поверхности) и рефракции (отклонения направления распространения радиоволн от прямолинейного) в нижних слоях атмосферы радиус зоны обслуживания r, км, РВС можно определить по формуле [2]

$$r = 4{,}12(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2}), \qquad (16.33)$$

где H_1 — высота передающей антенны, м; H_2 — высота приемной антенны, м.

Определение зоны обслуживания. Зона обслуживания РВС МВ диапазона при наличии только атмосферных и промышленных помех (т.е. при отсутствии мешающих передатчиков) может быть определена по формуле (16.6), преобразованной к виду

$$R(L) = E_{\min} - E_{\text{пол}}(r_{\text{пол}}, 90, 50) - P_{\Sigma\text{пол}} \quad \text{для } T = 90\ \% \qquad (16.34)$$

и

$$R(L) = E_{\min} - E_{\text{пол}}(r_{\text{пол}}, 99, 50) - P_{\Sigma\text{пол}} \quad \text{для } T = 99\ \%, \qquad (16.35)$$

где $R(L)$ следует выражать в дБ.

Значение $E_{\text{пол}}(r_{\text{пол}}, T, 50)$ при заданном $r_{\text{пол}}$ можно определить по рис. 16.4, на котором приведены зависимости изменения напряженности ЭМП от расстояния и высоты подъема передающей и приемной антенны для диапазона частот 30...250 МГц, $P_\Sigma = 1$ кВт, $L = 50$ % и разных значений времени превышения 1, 10, 50 % (кривые МККР).

Между значениями напряженности ЭМП для произвольного времени T, %, и медианным значением ($T = 50$ %) существует связь, определяемая выражением

$$E(r, T, 50) = E(r, 50, 50) + R(T), \qquad (16.36)$$

где $R(T)$ определяется по графикам медленных и быстрых изменений напряженности электромагнитного поля [1, 3].

Значение $R(L)$ также определяется по графикам (рис. 16.3). Такие графики для разных частотных диапазонов и вариантов рельефа местности представлены в документах МККР. Значение $\Delta h = 50$ м соответствует слабо пересеченной местности, $\Delta h = 150$ м — средне, а $\Delta h = 300$ м — сильно пересеченной местности.

На границе зоны обслуживания вероятность уверенного приема обычно задают равной 50 %. Для равнинной или слабо пересеченной местности $E_{\text{пол}}$ можно определить из (16.34), (16.35), подставив значения $E_{\min}$, P_Σ и $R(L) = 0$ и пользуясь при этом кривыми МККР (см. рис. 16.4) для $T = 90$ % и $T = 99$ % либо кривыми для $T = 50$ % с учетом поправочных коэффициентов $R(T) = R(90)$ и $R(T) = R(99)$.

График защитных отношений по радиочастоте $A_{\text{рч}}$, рекомендуемых МККР для монофонического приема ЧМ сигналов при максимальной девиации частоты, равной ±50 кГц, показаны на рис. 16.14 (кривая *1*).

При работе двух РВС, передающих монофонические сигналы в совмещенном частотном канале, $A_{\text{рч}} = 32$ дБ, т.е. отношение напряженности ЭМП полезной и мешающей РВС на границе зоны обслуживания должно быть не менее 39,8 раз. Для радиостанций, передающих разные программы, при разносе частот $\Delta f = 180$ кГц $A_{\text{рч}} = 0$, т.е. эти РВС могут создавать в точке приема поля с одинаковыми величинами напряженности, не вызывая взаимных помех. Для РВС передающих

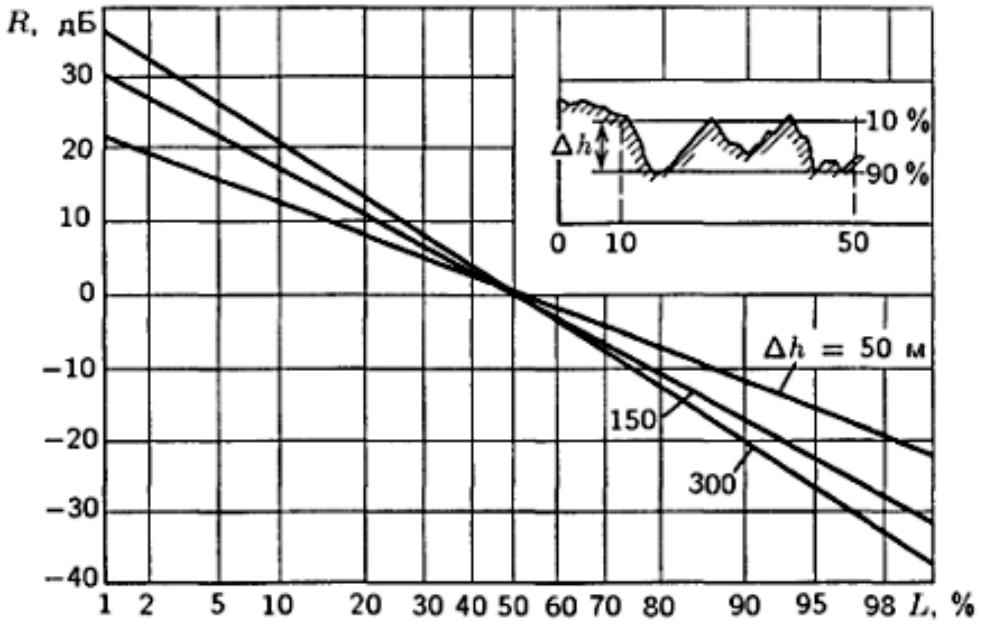


Рис. 16.13. Зависимость распределения напряженности электромагнитного поля от процента точек приема

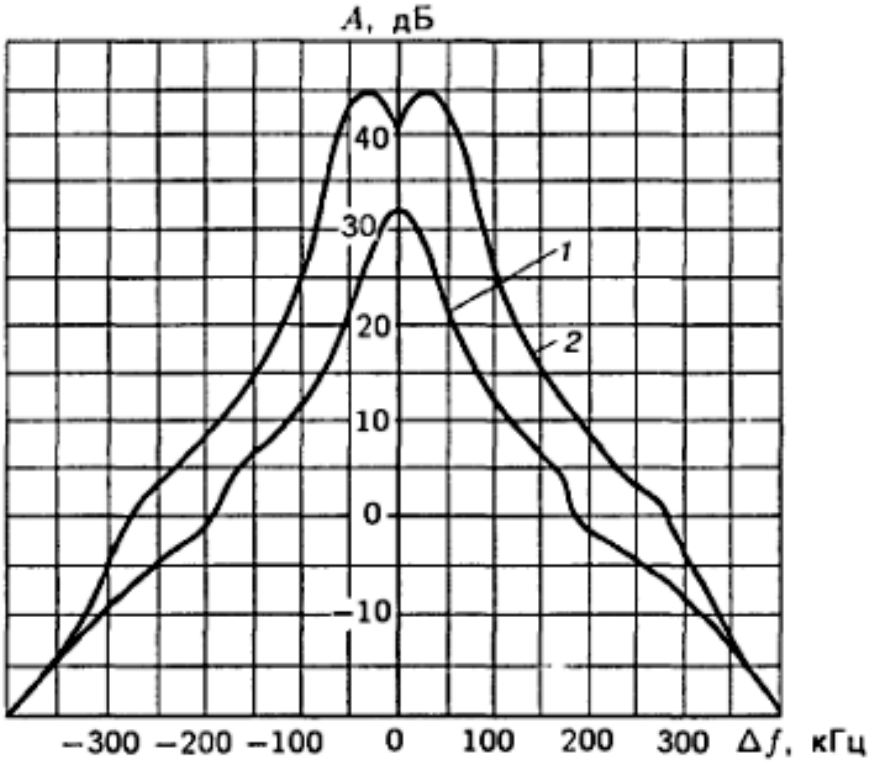


Рис. 16.14. Зависимость защитного отношения по радиочастоте от разности между несущими частотами полезного и мешающего сигналов для моно- (кривая *1*) и стереоприема (кривая *2*) МВ-ЧМ станций

одинаковые монофонические программы, допускается значение $A_{\text{рч}} = 0$ при разносе частот $\Delta f = 120$ кГц.

График защитных отношений для случая приема стереофонических ЧМ сигналов показан на рис. 16.14 (кривая *2*). При разносе несущих частот $\Delta f = 0$ защитное отношение $A_{\text{рч}} \approx 41$ дБ. Максимально защитное отношение $A_{\text{рч}} \approx 45$ дБ должно быть реализовано при значении $\Delta f = 40$ кГц.

Наличие помех от другой РВС приводит к сокращению зоны обслуживания. Если мешающая РВС одна и создаваемые ею помехи намного превышают помехи промышленного и бытового происхождения, то параметры зоны обслуживания могут быть рассчитаны по формуле (16.6а).

При известном защитном отношении, заданном применительно к медианному значению напряженности ЭМП, для монофонического и стереофонического приема принимается [1, 3]

$$R(T) = R(90) = R(99) = 0 \text{ и } E_{\text{пол}}(r_{\text{пол}}, T, L) = E_{\text{пол}}(r_{\text{пол}}, 50, 50).$$

Тогда выражение (16.6) для моноприема преобразуется к виду

$$K(L) = A_{\text{рч}} + P_{\Sigma\text{меш}} - P_{\Sigma\text{пол}} - E_{\text{пол}}(r_{\text{пол}}, 50, 50) + E_{\text{меш}}(r_{\text{меш}}, 10, 50), \tag{16.37}$$

а для стереофонического приема

$$K(L) = A_{\text{рч}} + P_{\Sigma\text{меш}} - P_{\Sigma\text{пол}} - E_{\text{пол}}(r_{\text{пол}}, 50, 50) + E_{\text{меш}}(r_{\text{меш}}, 1, 50), \tag{16.38}$$

Подставляя в уравнения (16.37), (16.38) известные значения $A_{\text{рч}}$, $P_{\Sigma\text{меш}}$, $P_{\Sigma\text{пол}}$ и $K(L) = 0$, по кривым МККР (рис. 16.4) находят в выбранном направлении такие расстояния $r_{\text{пол}}$ от полезного и $r_{\text{меш}}$ от мешающего передатчиков, при которых значения $E_{\text{пол}}(r_{\text{пол}}, 50, 50)$ и $E_{\text{меш}}(r_{\text{меш}}, T, 50)$ удовлетворяют одному из указанных уравнений. Подобные вычисления выполняют и для других направлений. После этого точки, для которых вычислены значения $r_{\text{пол}}$, соединяют плавной кривой, которая отображает конфигурацию зоны обслуживания.

При наличии нескольких мешающих РВС расчеты значительно усложняются и их выполняют на ЭВМ с применением специальных программ.

4. Особливості планування мереж цифрового радіомовлення

4.1 Особливості планування мереж цифрового радіомовлення

Перехід до цифрового радіомовлення на метрових хвилях (замість аналогового) припускає надання більш високої якості радіомовного прийому. Це зумовлює перехід від методу планування мережі за рекомендацією ***"90% часу і 50% точок прийому", прийнятого в аналоговому радіомовленні, до більш суворих критеріїв, наприклад, "99% часу і 99% точок прийому".*** Подібний перехід не супроводжується плавною зміною якості прийому (як в аналоговому мовленні: при плавному зменшенні напруженості поля сигналу якість прийому погіршується плавно).

У системах цифрового мовлення проявляється пороговий ефект: зниження напруженості поля сигналу нижче деякого порогу (обумовленого захисним відношенням!) призводить до повного пропадання сигналу на прийомі. *Саме тому неприйнятною є ситуація, коли не гарантується прийом сигналу радіомовлення протягом 10% часу, а також доведення програми мовлення лише до 50% слухачів.*

Кількісні критерії, прийнятні для планування аналогового радіомовлення стають неприйнятними для цифрового.

Розвиток методик планування цифрових мереж радіомовлення триває. Нижче викладаються тільки деякі аспекти такого планування.

4.1.1. Параметри систем радіомовлення, необхідні для проектування та планування цифрової мережі радіомовлення

Вибір основних системних параметрів при проектуванні систем і плануванні мереж цифрового радіомовлення вимагають обліку особливостей умов поширення радіохвиль *(площа обслуговування, рельєф місцевості, висота забудови, рівень шумів і завад), а також відсотку часу, протягом якого має місце гарантована якість прийому, та ін.*

Нижче приводиться неповний перелік параметрів систем радіомовлення:

- ***кількість і тип*** (моно, стерео, комбіноване стерео) ***звукових програм в одному пакеті та загальна кількість різних по складу пакетів програм на території обслуговування,***
- ***географічне положення та розміри території обслуговування, переважаючий рельєф місцевості*** (тільки рівнинна або слабко пересічена місцевість із населеними пунктами малоповерхової забудови допускає можливість використання безпосереднього цифрового радіомовлення; горбкувата або гірська місцевість, населені пункти з багатоповерховою забудовою вимагають застосування систем T-DAB або наземно-супутникових систем),
- ***метод передачі сигналів*** (послідовний або паралельний),
- ***діапазон і допустима ширина смуги частот радіосигналів***,

- метод кодування джерела та степінь зжимання сигналу,

- метод кодування каналу та розміри матриці перемежування,

- вид і параметри модуляції,

- рознесення несівних частот передавачів,

- вибірковість і смуга пропускання приймача,

- тип демодулятора та спосіб прийняття рішень у ньому,

- спосіб організації радіомовлення на заданій території (тип мережі мовлення - одно- або багаточастотна),

- характеристика завадообстановки в зоні обслуговування і т.д.

Дані параметри беруть участь у реалізації наданих системами радіомовлення **споживчих якостей (послуг)** на території обслуговування.

Розрізняють два ***види послуг*** - тільки стаціонарний прийом або мобільний і стаціонарний прийом.

Обсяг послуг може передбачати:

- радіомовні програми плюс необхідний мінімум додаткової цифрової інформації,
- радіомовні програми плюс великий обсяг додаткової цифрової інформації, зокрема послуг, не пов'язаних із прийомом звукових програм (пейджинг, телефакс, GPS та ін.).

Якість звукових програм може бути, наприклад, такою:

- тільки стерео, якість компакт-диску,
- стерео плюс моно,
- тільки моно, звичайна якість мовлення.

Умови прийому сигналів мовлення, типові для території обслуговування, у вирішальній степені впливають на вибір варіанта побудови системи та мережі, а, отже, на технічну складність і вартість їхньої реалізації.

У випадку використання супутникового сегменту в проектованій системі мовлення повинні бути задані:

- тип і висота орбіти ШСЗ (у тому числі припустимі межі для координат точки стояння ШСЗ на геостаціонарній орбіті),

- частота радіоканалу "вниз" (на лінії ШСЗ-Земля) і припустима ширина смуги частот,

- обмеження на припустиму густину потоку потужності радіосигналу в поверхні Землі.

4.1.2 Особливості планування мереж

Для проектування мереж цифрового радіомовлення **на частотах нижче 30МГц** у значній мірі придатні рішення, підтверджені практикою для традиційних наземних систем мовлення з амплітудною модуляцією. Зрозуміло, є і своя специфіка. Пояснимо це.

При розробці основних аспектів цифрового радіомовлення спочатку передбачалася орієнтація на традиційні багаточастотні мережі при використанні послідовної передачі сигналу.

Ідея багаточастотної мережі полягає в тому, що в різних зонах обслуговування використовуються різні смуги частот (канали радіомовлення). *Наприклад, у трьохчастотній мережі використовуються три смуги частот, причому в кожній смузі кожна радіопрограма випромінюється на своїй робочій частоті.* Якщо в трьохчастотній мережі необхідно передати шість програм мовлення, то потрібно використовувати 18 несівних (робочих) частот. За рахунок частотного та територіального рознесення знижується рівень взаємних завад - при переході до трьохчастотної мережі та захисному відношенні 6 дБ виявляється можливим практично повне покриття території мовленням при прийманні на ненаправлену антену.

Платою за цю безсумнівну перевагу виступає ускладнення (і подорожчання) приймача (приймач повинен містити синтезатор частот, що виконує функції гетеродину) і модулятора передавача. Чим більше програм мовлення, тим погіршені згадані недоліки.

Залишається і проблема боротьби із багатопроменевістю. В умовах слабкої багатопроменевості (рівнинна та слабкопересічна місцевість, а також малоповерхові міста) ***застосування послідовної передачі цілком прийнятно і навіть доцільно, оскільки зі збільшенням числа програм не відбувається пропорційного збільшення швидкості передачі в радіоканалі.*** При проектуванні таких мереж цілком прийнятно користуватися методикою планування станцій мовлення традиційного аналогового радіомовлення в діапазоні метрових хвиль.

Аналіз показує, що виходячи із допустимої ймовірності помилок при прийманні $10^{-3}...10^{-4}$, необхідна величина захисного відношення при когерентному прийомі становить від 8 дБ (при бінарній відносній фазовій маніпуляції ОФМ-2) до 12...15 дБ (при чотирьохпозиційній -ОФМн-4).

Якщо **при одночастотному плануванні** гіпотетичної мережі мовлення використовувати найпростіші ненаправлені антени, *то зона обслуговування складатиме лише 50% від заданої (при ОФМ-2) і до 35% (при ОФМн-4).* **Застосування ж направлених приймальних антен з коефіцієнтом підсилення не менше 20 дБ знижує вплив заважаючих станцій і збільшує зону обслуговування до стопроцентної.**

Одночастотна мережа цифрового радіомовлення з послідовним методом передачі цифрових сигналів забезпечує повне покриття території тільки при прийманні на направлені антени, і тому **може відігравати роль лише розподільної системи**.

З викладеного вище випливає, що прийом на автомобільні приймачі (найважливіша умова роботи цифрового радіомовлення!) в одночастотній мережі ускладнений.

Загальні положення по побудові систем і плануванню мереж цифрового радіомовлення на частотах вище 30 МГЦ фахівці сформулювали наступним чином:

- мережа цифрового радіомовлення повинна забезпечувати повне покриття території мовленням при прийманні до шести стереофонічних програм на стаціонарні приймачі з направленою антеною і на переносні та автомобільні приймачі з ненаправленою антеною; *імовірність упевненого прийому як на відкритій місцевості, так і в умовах міста з інтенсивною багатоповерховою забудовою повинна бути не менше, ніж при традиційному мовленні на метрових хвилях (у діапазонах 66...74 і 88...108 МГц)*;

- радіомовна мережа, діапазон частот і методи передачі повинні бути спільними як для стаціонарного, так і для мобільного прийому;

- мережа мовлення повинна володіти електромагнітною сумісністю зі службами, що працюють у тих же діапазонах, як усередині країни, так і за її межами.

Для перспективного планування ефірних мереж цифрового радіомовлення та телебачення важливим пунктом є забезпечення 100-процентного покриття території країни (чого не було в аналогових системах радіомовлення). Даний пункт визначає принципи призначення робочих частот станцій мовлення, розташування останніх, обґрунтований вибір потужності станцій і висот підвісу передавальних антен, тобто те, що становить зміст частотно-територіального рознесення радіоелектронних засобів.

Практична реалізація згаданого положення ускладнена. Тому виникає необхідність використання додаткових засобів мовлення, наприклад, у рамках змішаної (гібридної) наземно-супутникової системи.

Прийняття європейського стандарту для наземної версії цифрового радіомовлення T-DAB, що використовує *паралельний* (багаточастотний) метод передачі кількох програм (систему COFDM, не плутати з багаточастотною мережею), уможливлює розгляд даного варіанту побудови мережі як альтернативу багаточастотній. ***У стандарті T-DAB "розпаралелювання" програм відбувається по піднесучих частотах (до модуляції несівної), тоді як у багаточастотній мережі розпаралелювання відбувається по несівних частотах.***

До параметрів планування мережі мовлення в діапазоні метрових хвиль відносяться:

1. Ефективно випромінювана потужність (добуток вихідної потужності передавача на коефіцієнт підсилення передавальної антени), (дБ/кВт).
2. Висота підвісу передавальних антен, (H_1, м).
3. Відстані між передавачами мережі (D, км).
4. Число використовуваних частот.
5. Криві поширення радіохвиль (див. наприклад, рис. 11.3).
6. Граничний відсоток точок прийому (L).
7. *Допустимий відсоток часу появи завад*.

8. Мінімально допустима напруженість поля ($E_{мін}$, дБ/мкв/м).

9. Ступінь нерівності місцевості (F(Δh), дБ).

10. Висота приймальної антени (H_2,м).

11. Захисне відношення (А, дБ).

При частотному плануванні мережі завдання вирішується з акцентом на ефективність використання радіочастотного спектра (ресурсу).

Згадана ефективність визначається шириною спектру радіосигналу (спектральною ефективністю радіосигналу) і використовуваною кількістю несівних (робочих частот).

Спектральна ефективність модульованого сигналу оцінюється показником

$$\gamma = R_{\Sigma}/\Delta f_{сигн}, \text{ (біт/с)/Гц.}$$

Тут R_{Σ} - швидкість сумарного (з урахуванням біт надлишковості та синхронізації) цифрового потоку, біт/с, $\Delta f_{сигн}$ - частотна смуга випромінюваного сигналу, Гц. Параметр γ показує, скільки біт у секунду можна передати в смузі шириною 1 Гц. Величину $\Delta f_{сигн}$ зазвичай визначають як смугу, у межах якої міститься 99% випромінюваної потужності. Орієнтовна оцінка величини γ часто обчислюється як

$$\gamma=0{,}8\log_2 M=0{,}8B,$$

де $B=\log_2 M$ - кратність маніпуляції, а **M** - число позицій (станів) маніпулюємого параметра: $M= 2^B$. Урахування додаткових біт (синхронізації та завадостійкого кодування) веде до зменшення теоретичної оцінки орієнтовно на 15...20%, оскільки становить інтерес ефективність використання спектру для передачі *інформаційного потоку*.

Реально досяжні значення γ для застосовуваних у цифровому радіомовленні видів маніпуляції представлені в табл. 11.1.

Таблиця 11.1. Спектральна ефективність радіосигналів з ФМн і КАМ

Вид модуляції	γ, (біт/с)/Гц	$\Delta f_{сигн}$, Гц	h, дБ	q, дБ
ВФМн-2	**0,6…0,8**	$0{,}8R_{\Sigma}$	**10,5**	**10,5**
ВФМн-4, 4КАМ	**1,25…1,5**	$0{,}8R_{\Sigma}/2$	**10,5**	**13,5**
16КАМ	**2,5…2,8**	$0{,}8R_{\Sigma}/4$	**17**	**20,5**
32КАМ	**3,2…3,5**	$0{,}8R_{\Sigma}/5$	**18,9**	**23,5**
64КАМ	**3,8…4,0**	$0{,}8R_{\Sigma}/6$	**22,5**	**26,5**
128КАМ	**4,5…4,8**	$0{,}8R_{\Sigma}/7$	**24,3**	**29,5**

Параметри **h** (необхідне відношення сигнал/шум на вході приймача на один біт інформації) і **q** (необхідне відношення сигнал/шум на вході приймача на один маніпуляційний символ) характеризують завадостійкість і енергетичну ефективність вибраного виду маніпуляції. Видно, що **кожне подвоєння кратності маніпуляції приводить до необхідності подвоєння випромінюваної потужності**.

Величина спектральної ефективності радіосигналу визначається "компактністю" спектру - часткою потужності, зосередженої в головному "пелюстку" спектра, тобто в смузі частот між першими "нулями" (рівної $2/\tau_c$, де τ_c - тривалість маніпулюючих імпульсів). У головному пелюстку спектра сигналу повинно знаходитись не менше 94...97% всієї енергії сигналу. Головний пелюсток широко розповсюдженого сигналу ОФМн-4 містить близько 87% енергії сигналу і саме тому спектральна ефективність останнього не перевершує 1,5 (біт/с)/Гц.

Результатами табл. 11.1 можна користуватися при виборі системи цифрового мовлення для конкретної запланованої мережі. Так, для реалізації системи T-DAB виявилося достатнім мати спектралыну ефективність радіосигналу не гірше 1,3...1,5, що й зумовило застосування квадратурної ВФМн-4. У консорціумі DRM закріплено застосування сигналів КАМ (від 4-КАМ до 64-КАМ), оскільки вимоги до спектральної ефективності більш високі. Подальшому покращенню спектральної ефективності радіосигналу сприяють застосування формуючого (згладжуючого) фільтра після модулятора та строгі вимоги до лінійності підсилювача сформованих сигналів.

Іншим способом підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу є організація цифрового мовлення за допомогою одночастотної мережі, оскільки всі радіопередавачі мовлення працюють у спільній смузі частот $\Delta f_{сигн}$. Однак, в одночастотній мережі для реалізації заданого захисного відношення **А** можливе тільки територіальне рознесення передавачів. Знайдено, що навіть у мережах аналогового високоякісного мовлення в метровому діапазоні 100...108МГц можна забезпечити суцільнопокриту територію лише трьома стереофонічними програмами.

Примітка. Відповідно до визначення, захисне відношення - це мінімальне значення відношення корисного сигналу до завади на вході приймача, якому відповідає певна якість звучання на його виході. ***У цифровому радіомовленні оцінка якості може бути замінена однозначно пов'язаною з нею ймовірністю появи помилок*** $p_{пом}$ на виході декодера.

У свою чергу, зв'язок номінальної величини $p_{пом}$ із якістю звуковідтворення визначається за відомою методикою (зокрема, з урахуванням вимог, предявлених рівню шуму інтерполяції, однозначно зумовленого величиною інтервалу маскування). Наприклад, у каналі мовленні з ВФМн без надлишкового кодування необхідна $(p_{пом})_{ном} \le 10^{-9}$. При введенні кодової надлишковості дана величина може бути збільшена на три-чотири порядки.

У зв'язку із цим при плануванні мереж цифрового радіомовлення під зоною (територією) обслуговування розуміється площа, у межах якої протягом заданого відсотку часу забезпечується виконання умови $p_{пом} < (p_{пом})_{ном} = 10^{-3} \dots 10^{-5}$. Величина $(p_{пом})_{ном}$ залежить від виду маніпуляції, способу обробки цифрового сигналу в приймачі, варіанту надлишкового кодування та застосовуваних способів маскування.

Для мовлення різних наборів (пакетів) звукових програм у суміжних зонах мовлення вимушено використовуються багаточастотні мережі із кластерним способом покриття території. Територія покривається набором однакових кластерів, які складаються у свою чергу з однакових зон обслуговування (комірок).

На мал. 11.10 представлена стільникова структура організації мовлення на території радіусу R з комірками радіусом R і використанням дев'яти частот у кластері. Комірки (зони обслуговування) з центром розміщення станції мовлення представлені в наглядному стільниковому кресленні (гексагональної форми).

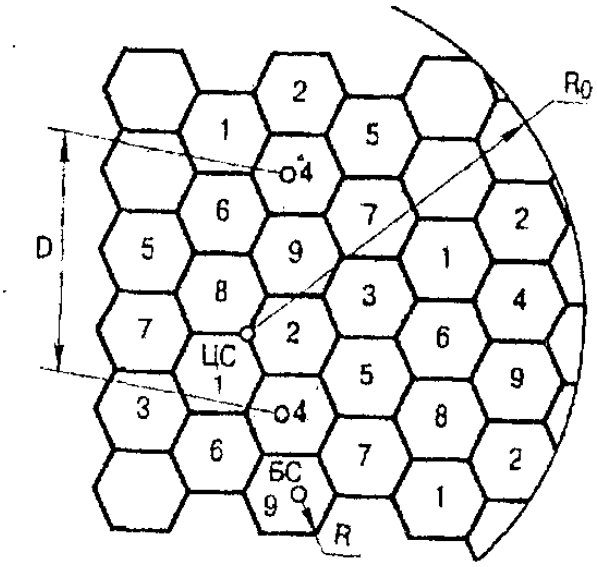


Рис. 11.10. Приклад стільникової структури організації мовлення

При стільниковому покритті реалізація заданого захисного відношення визначається величиною кластера $\mathbf{К_{кл}}$ (*числом комірок у наборі, що має неспівпадаючі робочі частоти*). Від цієї величини залежить відстань між зонами із співканальними завадами, тобто завадами прийому програм від найближчих радіопередавачів мовлення з однаковими несівними. Зі збільшенням $\mathbf{К_{кл}}$ зростає відстань **D** (територіальне рознесення) між радіопередавачами з однаковими робочими частотами.

Тому при проектуванні (плануванні) мереж на частотах вище 30 МГц для випадку суцільного покриття території обслуговування, як правило, орієнтуються на стільниковий варіант покриття із числом частот, визначеними зі співвідношення $\mathbf{К_{кл}=(a+b)^2-ab}$, де a і b - цілі позитивні числа. Мережа може бути трьохчастотною, чотирьохчастотною, семичастогною і т.д. Зрозуміло, що з метою економного використання радіочастотного ресурсу варто прагнути до зменшення $\mathbf{К_{кл}}$. При $\mathbf{К_{кл}}$ =3 мережа буде трьохчастотною, при $\mathbf{К_{кл}}$=9 – дев’ятичастотною. Дана ідея може використовуватися при стільниковому покритті території кожним з можливих варіантів - у наземних мережах, променями супутникового мовлення від ретрансляторів на ШСЗ (система S-DAB "MediaStar"), рис. 11.11, і в комбінованих наземно-супутникових мережах.

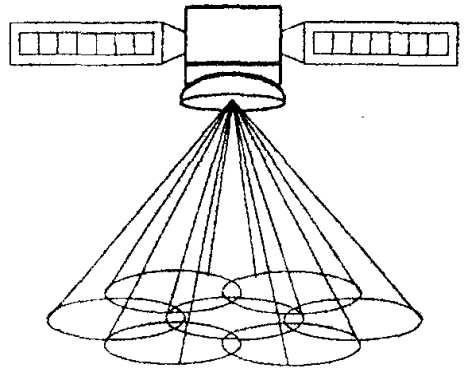


Рис. 11.11. Використання багатопроменевої антени ретранслятора на ШСЗ для стільникового покриття території обслуговування

Мережі передавачів T-DAB плануються за принципом один передавач, або одночастотна

мережа, що використовує ненаправлені антени ("відкрита мережа"), або одночастотна мережа станцій, що використовують направлені антени по периметру території покриття ("закрита мережа").

***Завдання планування полягає в тому, щоб забезпечувався прийнятний компроміс між щільністю передавачів для заданого покриття та можливістю повторного використання тих самих частот з іншим програмним наповненням в інших зонах території обслуговування*.**

Питання для самоконтролю

1. Які частоти розподілені для служб радіомовлення в кілометровому діапазоні частот ? Які крок сітки і смуга частот випромінювання? Дайте характеристику середовища розповсюдження радіохвиль в даному діапазоні.
2. Які частоти розподілені для служб радіомовлення в гектометровому діапазоні частот ? Які крок сітки робочих частот і смуга частот випромінювання ? Дайте характеристику середовища розповсюдження радіохвиль в даному діапазоні.
3. Які частоти розподілені для служб радіомовлення в декаметровому діапазоні частот ? Які крок сітки робочих частот і смуга частот випромінювання ? Дайте характеристику середовища розповсюдження радіохвиль в даному діапазоні.
4. Які частоти розподілені для служб радіомовлення в метровому діапазоні частот? Які крок сітки робочих частот і смуга частот випромінювання ? Дайте характеристику середовища розповсюдження радіохвиль в даному діапазоні.
5. Аргументуйте, які міри приймаються для організації мовлення при добовій і сезонній змінах умов розповсюдження декаметрових хвиль.
6. Аргументуйте залежність площі зони обслуговування мовної радіостанції від захисного відношення. Що розуміється під захисним відношенням на звуковій і радіочастоті ?
7. Аргументуйте економічну доцільність трикутної форми сітки територіального планування мовної мережі перед квадратною.

ДОДАТОК Ж. РИСУНКИ ДО ЛЕКЦІЇ №8

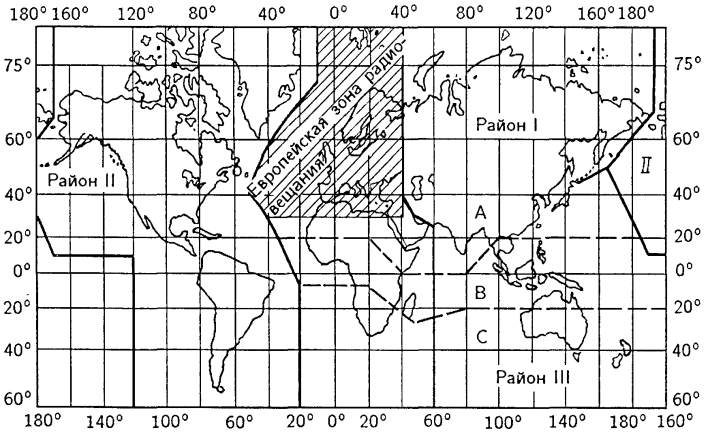


Рис.9.1. Зоны распределения радиочастот между странами

Таблица 9.2. Полосы частот для радиовещания

Номер диапазона	Наименование диапазона длин волн и радиовещательного диапазона	Частоты, МГц	Длина волн, м
5	КМВ (длинные волны, ДВ)	0,1485...0,2855	2020,2...1050,79
6	ГМВ (средние волны, СВ)	0,5265...1,6065	569,8...186,74
7	ДКМВ (короткие волны, КВ)	3,20...3,640	90
		3,95...4,0	75
		4,75...4,995	62
		5,006...5,06	59
		5,95...6,20	49
		7,10...7,30	41
		9,50...9,90	31
		11,65...12,05	25
		13,6...13,8	22
		15,10...15,60	19
		17,55...17,90	16
		21,45...21,85	13
		25,67...26,10	11
8	МВ (ультракороткие волны, УКВ)		
	УКВ1 (выделен в России)	65,9...74	4,55...4,054
	УКВ2	87,5...108	3,43...2,78

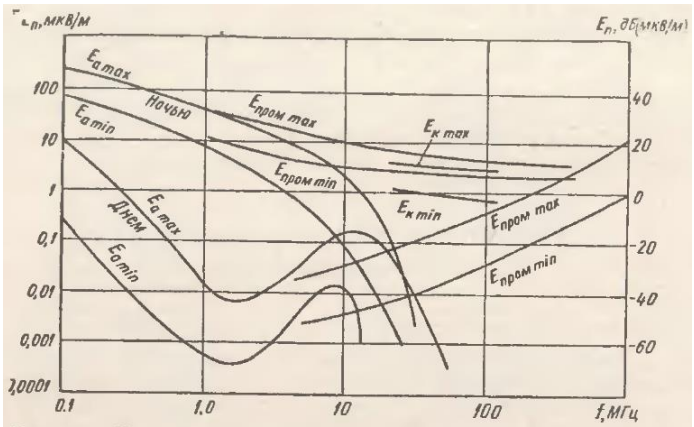


Рис. 2.1. Кривые усредненного уровня различных помех в полосе $\Delta f = 1$ кГц различных частотных диапазонов

Таблица 16.4

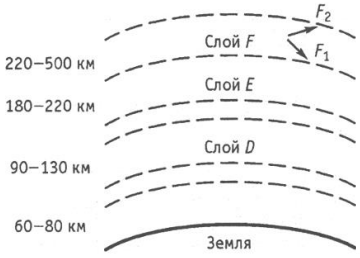
Диапазон волн	Условия приема	E_{min}, дБ, относительно 1 мкВ/м
Средние волны (СВ)	Земная волна, светлое время суток, зона обслуживания ограничена атмосферными помехами	60
	Земная волна, светлое время суток, имеются помехи от других РВС	63
	Земная волна, темное время суток. Прием осуществляется в сельской местности (имеются атмосферные помехи)	71
	Земная волна, темное время суток. Прием осуществляется в городских условиях (имеются промышленные помехи)	77
Длинные волны (ДВ)	Независимо от условий приема	77

Таблица 9.1. Наименование частотных диапазонов

Номер частотного диапазона	Наименование диапазона частот (длин волн)	Сокращенное название	Диапазон	
			частот	длин волн
4	Очень низкие (мириаметровые волны)	ОНЧ	3...30 кГц	100...10 км
5	Низкие (километровые волны)	НЧ	30...300 кГц	10...1 км
6	Средние (гектометровые волны)	СЧ	300...3000 кГц	1000...100 м
7	Высокие (декаметровые волны)	ВЧ	3...30 МГц	100...10 м
8	Очень высокие (метровые волны)	ОВЧ	30...300 МГц	10...1 м
9	Ультравысокие (дециметровые волны)	УВЧ	300...3000 МГц	100...10 см
10	Сверхвысокие (сантиметровые волны)	СВЧ	3...30 ГГц	10...1 см
11	Крайне высокие (миллиметровые волны)	КВЧ	30...300 ГГц	10...1 мм
12	Децимиллиметровые волны		300...3000 ГГц	1...0,1 мм

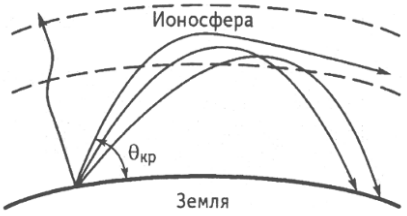
Таблица №9.3. Виды модуляции для различных диапазонов частот

Наименование радиовещательного диапазона	Вид модуляции аналоговых радиовещательных сигналов
ДВ	Амплитудная модуляция (АМ)
СВ	АМ (для монофонического вещания)
КВ	АМ и однополосная модуляция (ОМ)
МВ (УКВ)	Частотная модуляция (ЧМ)



Ионизированные слои ионосферы

Распространение гектометровых волн



К выбору рабочих частот диапазона декаметровых волн

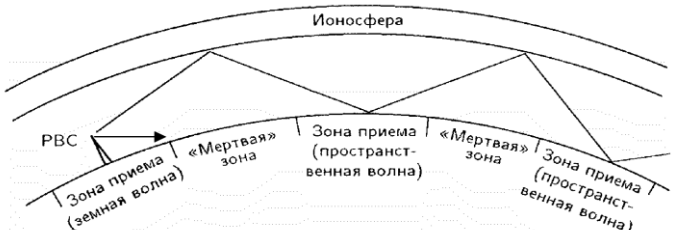


Рис.9.12. Распространение радиоволн ДКМВ (КВ) диапазона

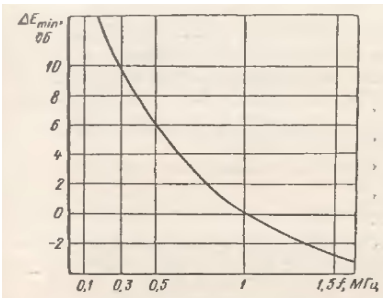


Рис. 2.5. Кривая поправок к определению E_{min}

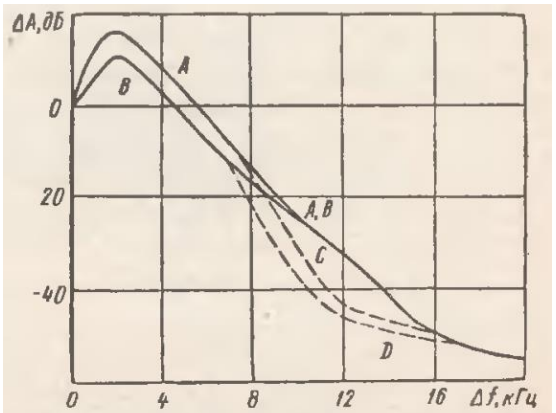


Рис. 2.6. Зависимость относительного значения защитного отношения по радиочастоте от разноса несущих частот РВС

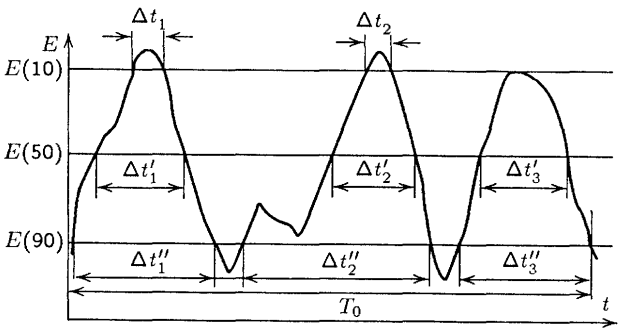


Рис.9.2 Диаграммы, иллюстрирующие определение относительного времени превышения заданного уровня напряженности ЭМП Т, %

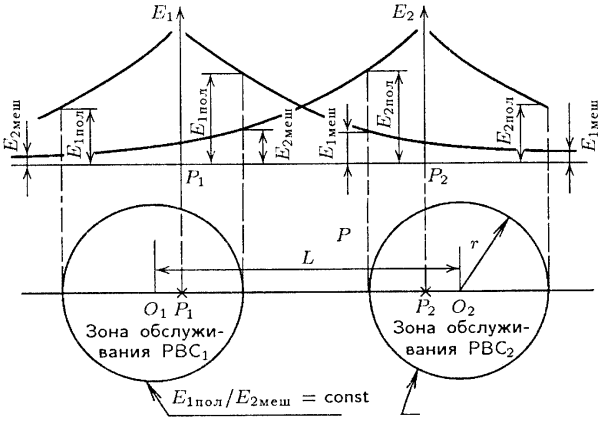


Рис.9.5. Зависимость изменения напряженности электромагнитного поля при наличии двух передатчиков в точках P_1 и P_2 и их зоны обслуживания

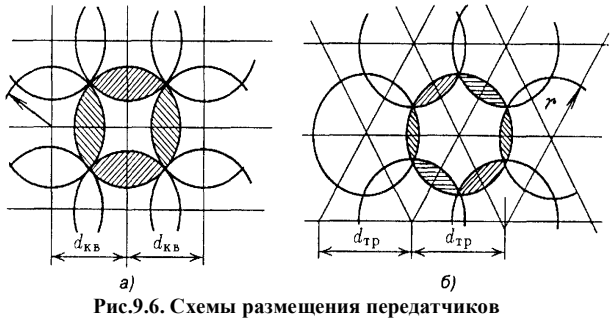


Рис.9.6. Схемы размещения передатчиков

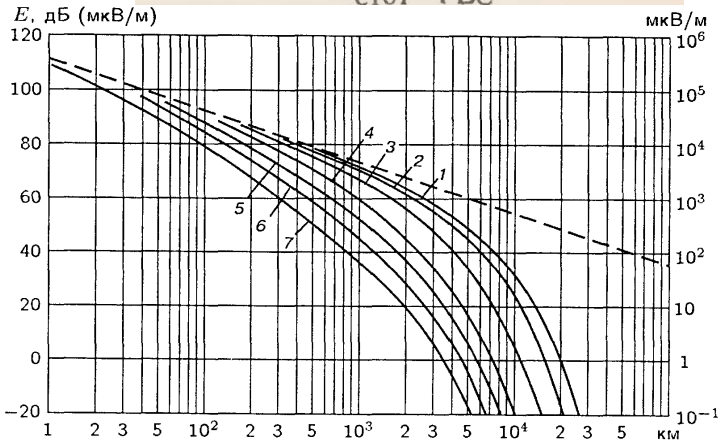


Рис. 9.3 Зависимости изменения напряженности поля от расстояния и частоты для P_Σ = 1 кВт; $\sigma = 3 \cdot 10^{-3}$ См/с, ε = 4 (кривые МККР): *1* — 150 кГц (2000 м); *2* — 200 кГц (1500 м); *3* — 300 кГц (1000 м); *4* — 500 кГц (600 м); *5* — 700 кГц (429 м); *6* — 1 МГц (300 м); *7* — 1,5 МГц (200 м)

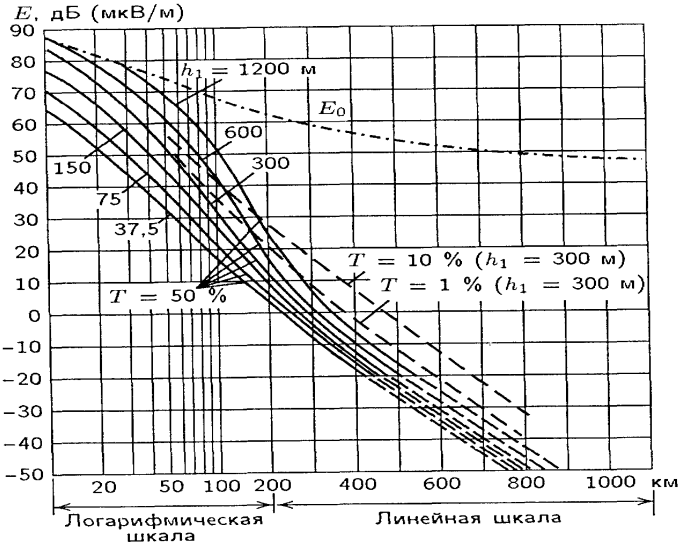


Рис.9.4. Зависимости изменения напряженности электромагнит-ного поля от расстояния и высоты h_1 передающей антенны для диапазона частот 30...250 МГц, P_Σ = 1 кВт; L = 50 % (кривые МККР)

ЛЕКЦІЯ №9 АНАЛОГОВЕ СИНХРОННЕ РАДІОМОВЛЕННЯ

ЛІТЕРАТУРА:

1. Брагин А.С. Технологиивещательных служб. Часть 1. Технологии звукового радиовещания. – К.: НТУУ «КПИ», 2006.
2. Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов./Под ред. Ю. А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком., Радио и связь, 2007. – 872 с.

РОЗДАТНИЙ МАТЕРІАЛ: див. ДОДАТОК З

1. Синхронне радіомовлення

В силу обмеженості частотного ресурсу, виділеного для мовлення в кіло- і гектометровому діапазонах, у низці країн (Італія, Франція, ФРН, Японія, колишній СРСР) знайшла застосування технологія синхронного радіомовлення.

Починаючи з 30-х років минулого століття, безупинно збільшувалися потужності передавачів мовлення і їхня кількість. Корисний ефект (охоплення мовленням все більших територій) супроводжувався ростом взаємних завад, що погіршують якість прийому мовних програм. Прагнення економного використання РЧР і зменшення взаємних завад і привело до обговорюваної технології.

Синхронним мовленням називається передача *загальної програми мовлення* кількома радіостанціями мовлення, *що працюють на одній і тій же хвилі (частоті)*. Воно ведеться переважно в гектометровому діапазоні з використанням поширення земних радіохвиль.

Замість одного передавача (великої потужності) "територія покриття мовленням" забезпечується за допомогою розосереджених передавачів меншої потужності. Це дозволяє отримати стійкий високоякісний прийом програм мовлення при порівняно невеликих капітальних і експлуатаційних витратах.

При синхронному мовленні в кіло- і гектометровому діапазонах використовується механізм РРХ земними (поверхневими) хвилями.

Системи й мережі синхронного радіомовлення мають наступні переваги:

1. без збільшення частотного ресурсу можна розширювати зону обслуговування та створювати великі напруженості поля земної хвилі (10...20мВ/м), що особливо важливо для якісного прийому програм у містах з високим рівнем промислових завад;
2. завдяки взаємному резервуванню синхронно працюючих передавачів підвищується надійність роботи всієї мережі мовлення;
3. напруженість поля від передавачів мовлення на обслуговуваній території змінюється в набагато менших межах, ніж напруженість поля від одного передавача мовлення, що покриває ту ж територію, рис.9.1.

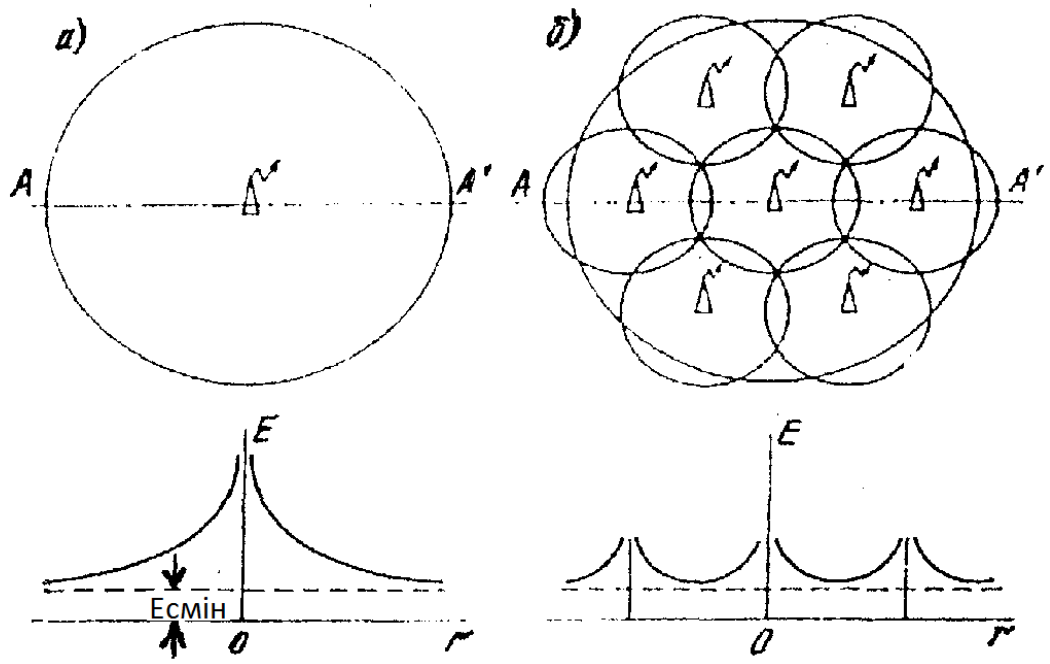


Рис.9.1. Зміна напруженості поля від відстані від одинокого радіомовного передавача (а) і в синхронній мережі мовлення (б)

Тому при рівній мінімально необхідній напруженості поля $E_{смін}$ *сумарна потужність* $P_{перΣ}$ *всіх передавачів, що працюють у синхронній мережі, виявляється істотно меншою потужності* $P_{пер}$ *одного передавача, що покриває ту ж територію обслуговування* ($P_{перΣ} < P_{пер}$). Замість передавачів на сотні кВт використовуються передавачі на одиниці кВт. *Капітальні й експлуатаційні витрати виявляються істотно нижчими, ніж з одним передавачем*.

Наприклад, розрахунки показують, що при заміні радіопередавачів потужністю 20 кВт передавачами потужністю 1 кВт їх потрібно буде в 4 рази більше, але загальні витрати енергії скоротиться при цьому в 5 разів. Для того, щоб додатково покращити економічні показники мережі синхронного мовлення (при збільшеному числі передавачів) передавачі переводяться в режим дистанційного керування з істотним зниженням обслуговуючого персоналу.

4. Передавачі на периферії території обслуговування при необхідності можуть мати й більшу потужність, ніж центральний, для того, щоб покращити умови прийому на окраїнах країни. Прикладом можуть виступати три мережі, що обрамляють всю прикордонну зону території Франції.

Основні технічні труднощі ("плата" за переваги) *у здійсненні синхронного радіомовлення полягають у витратах на забезпечення режиму синхронізму (синфазності) несівних частот всіх передавачів мережі та синхронність модуляції програмою цих несівних.* Відомі три способи підтримки синхронізму:

- *за допомогою передачі по кабельних лініях* на всі передавачі загального опорного сигналу, по якому підтримується синхронізм несівної частоти,

- *шляхом прийому* (на кожній станції мовлення) *сигналів служби точних частот* і сигналів єдиного часу; як і в попередньому випадку, прийняті сигнали використовуються в якості опорних для підтримання синхронізму несівних частот,

- еталонні сигнали створюються високостабільними (опорними) генераторами, частоти яких зрівнюються перед початком кожного сеансу мовлення, а також під час спеціальних пауз; у цій паузі передається "опорна частота" від провідної станції для підстроювання по ній веденої.

Перша ідея ілюструється рис. 9.2.

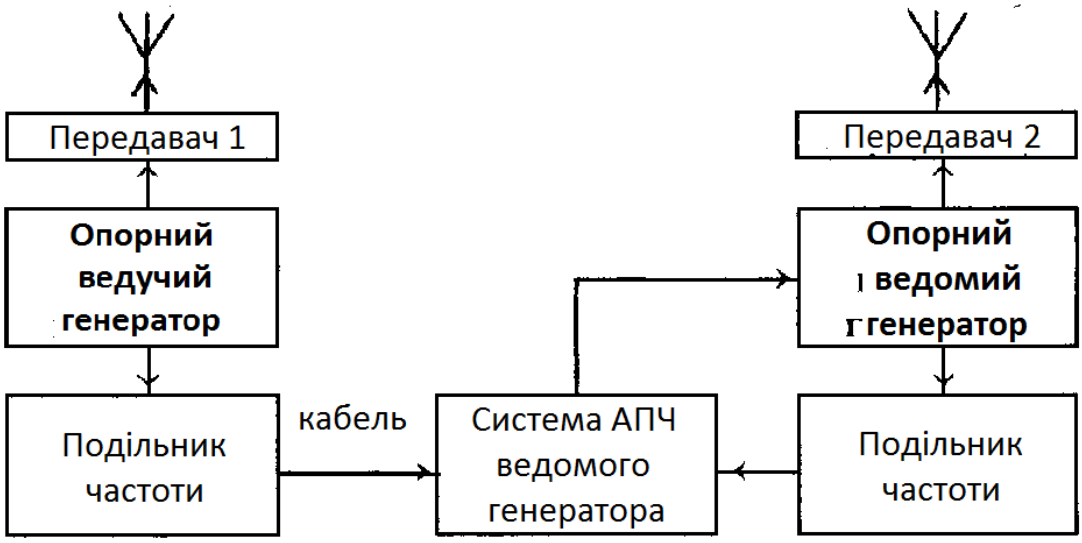


Рис. 9.2. Схема підтримки синхронізму несівних частот радіопередавачів

Частота опорного провідного генератора знижується (за допомогою дільника частоти) до величини, зручної для передачі по кабельній лінії до інших передавачів мережі мовлення. На ведених станціях прийнята частота є опорною в системі фазової АПЧ для підстроювання (з точністю до фази) власного джерела, використовуваного для формування несівної частоти ведених передавачів мовлення. При розходженні частот веденого й провідних опорних генераторів виробляється коректуюча дія на останні з метою усунення згаданого розходження.

Частіше використовується *другий спосіб*. Джерелом опорного коливання в другому способі є ***випромінювання передавачів служби точних частот***. Зазвичай використовуються передавачі точних частот, що працюють на кілометрових хвилях, що володіють більш стабільними характеристиками (малими флуктуаціями фази в середовищі поширення радіохвиль).

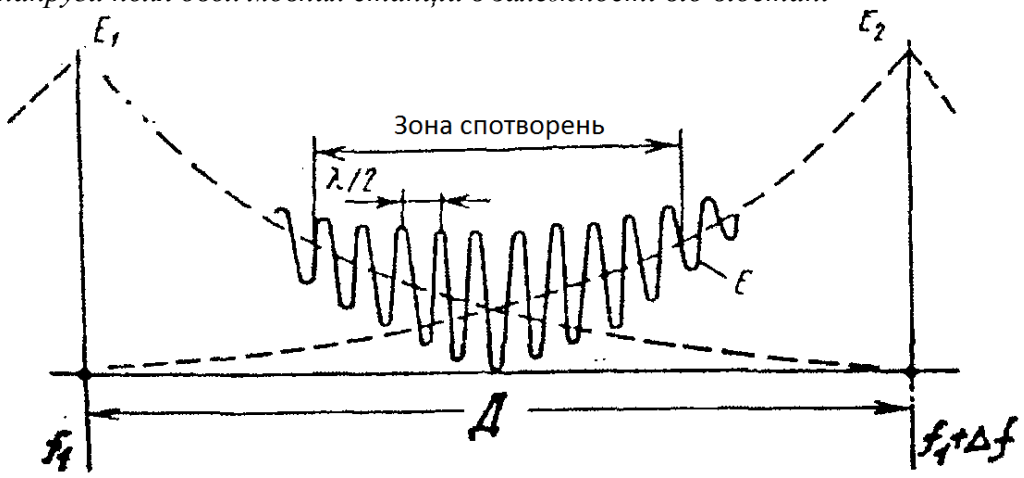
Еталонні сигнали від передавачів точних частот приймаються спеціальним радіоприймачем, наявним в комплекті кожної веденої станції мовлення. Еталонні сигнали від приймача сигналів точних частот використовуються так само, як і в схемі рис. 9.2, для синхронізації веденого опорного генератора.

Викладена ідея покладена в основу коректуючої дії на ведені опорні генератори і *за третім способом*, але тільки не безперервно, а в спеціальних паузах. Він найменш зручний.

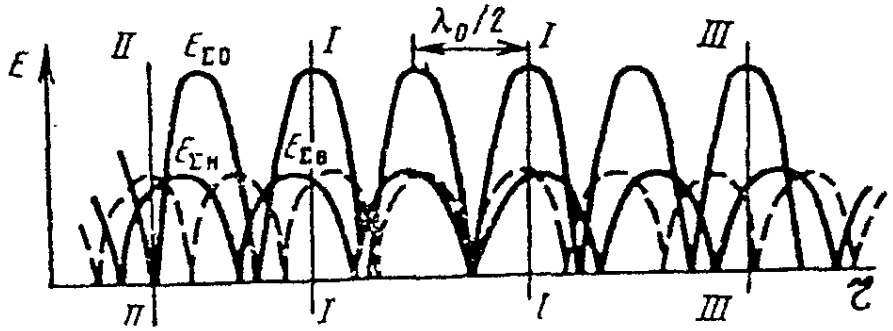
Аргументуємо важливість синхронізації несівних коливань передавачів мовлення у даній технології.

На рис.9.3 представлені місця розміщення ($\mathbf{P_{c1}}$ і $\mathbf{P_{c2}}$) двох "синхронних станцій" на відстані **Д**, які працюють у загальному випадку з малим

а) зміна напруги поля двох мовних станцій в залежності від відстані



б) ділянки з різною напруженістю поля двох станцій мовлення



в) "доріжки" поганого прийому

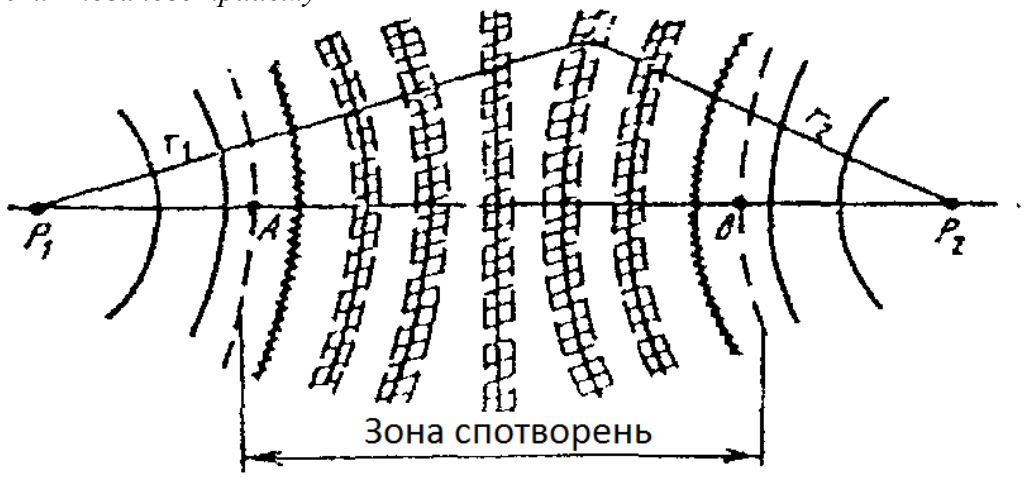


Рис. 9.3 Зона спотворень при синхронній роботі передавачів

асинхронізмом несівних частот ($\mathbf{f_1}$ і $\mathbf{f_1+\Delta f}$). По осі ординат відкладено значення напруженості поля станцій в залежності від відстані ($\mathbf{r_1}$ і $\mathbf{r_2}$, відповідно).

а) зміна напруженості поля двох станцій мовлення в залежності від відстані

Значення напруженості електричного поля від кожної із станцій можна представити у вигляді

$$\mathbf{e_1 = (E_1/r_1)\cos(2\pi f_1 t + \varphi_{н1})} \quad \text{і} \quad \mathbf{e_2 = (E_2/r_2)\cos[(2\pi(f_1+\Delta f)t + \varphi_{н2}]},$$

де $\mathbf{e_1}$ і $\mathbf{e_2}$ - миттєві значення коливань напруженості поля,

$\mathbf{E_1}$ і $\mathbf{E_2}$ - амплітуди коливань,

$\mathbf{r_1}$ і $\mathbf{r_2}$ - відстані від першої та другої станції до точки, у якій здійснюється приймання сигналів мовлення,

$\boldsymbol{\varphi_{н1}}$ і $\boldsymbol{\varphi_{н2}}$ - початкові фази несівних коливань.

Якщо передавачі працюють у режимі повного синхронізму ($\Delta f=0$; $\varphi_{н1}-\varphi_{н2}=\Delta\varphi_н=\text{const}$), то в результаті інтерференції в просторі між станціями утворюються стоячі хвилі електромагнітного поля.

В області, де амплітуди напруженості електричного поля $\mathbf{E_1/r_1 \approx E_2/r_2 = E_0}$, напруженість результуючого поля

$$\mathbf{E}_\Sigma = 2\mathbf{E}_0 \left| \cos(2\pi/\lambda) \right| \Delta\mathbf{r} ,$$

де $\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r_1} - \mathbf{r_2}$.

З отриманого виразу видно, що відстань між пучками (або вузлами) електричного поля дорівнює половині довжини хвилі несівного коливання: $\mathbf{\Delta r = 0{,}5\lambda}$.

Якщо амплітудна модуляція здійснюється гармонічним коливанням із частотою **F**, то вузли та пучки коливань результуючої напруженості електричного поля $\mathbf{E_\Sigma}$ верхньої бокової ($\mathbf{f_1+F}$, довжина хвилі $\lambda_в$), несівної ($\mathbf{f_1}$, довжина хвилі λ_0) і нижньої бокової ($\mathbf{f-F}$, довжина хвилі $\lambda_н$) будуть розміщуватися через різні інтервали (рівні відповідно $0{,}5\lambda_в$, $0{,}5\lambda_0$ і $0{,}5\lambda_н$).

На рис.9.3,б показано розподіл напруженості електричного поля між станціями мовлення. Максимальні значення поля несівного коливання ($\mathbf{E_{\Sigma 0}}$), верхньої бокової ($\mathbf{E}_{\Sigma в}$) і нижньої бокової смуги ($\mathbf{E}_{\Sigma н}$) на деякому інтервалі не збігаються. Це призводить до того, що на окремих ділянках якість прийому знижується.

Лінією 1 на рис.9.3,в відзначені ділянки, де прийом здійснюється з хорошою якістю, оскільки амплітуди напруженості поля несівного коливання і бокових досить великі, при чому $\mathbf{E_{\Sigma в} \approx E_{\Sigma н}}$.

У межах ділянки, позначеної лінією II, амплітуда несівного коливання дуже мала, а амплітуди бокових близькі до максимального значення (як у сигналі з балансною модуляцією).

У межах ділянки III досить велика амплітуда несівного коливання та верхньої бокової. Прийнятий сигнал близький до односмугового з неподавленою несівною. Поблизу ділянок II і III якість прийому буде низькою, оскільки після амплітудного демодулятора з'являться продукти нелінійних спотворень.

Геометричним місцем вузлів і пучків напруженості поля $\mathbf{E_\Sigma}$ при роботі двох "синхронних станцій" є гіперболи, фокусами яких є точки $\mathbf{P_{c1}}$ і $\mathbf{P_{c2}}$, рис.9.3,в. Штрихуванням відзначені "доріжки" поганого прийому, які групуються біля вузлів поля. Доріжки якісного прийому чергуються з доріжками поганого прийому. Ближче до меж зон спотворень доріжки поганого прийому звужуються і, нарешті, зовсім зникають.

Залежно від довжини хвилі несівного коливання і допустимої величини захисного відношення **зона спотворень** (ділянка А - В) **може становити (7...15)%** від відстані між станціями **Д**.

Допустима величина захисного відношення при роботі станцій з **Δf≠0** залежить від величини **Δf.** Так, при **Δf=20 Гц, Δf=2 Гц і Δf=0,015 Гц** припустима величина захисного відношення становить відповідно ***16***, ***10*** і ***4*** дБ. Як буде показано далі, *зона якісного прийому в мережі синхронного мовлення значно більша, ніж у мережі станцій, що працюють на сумісних частотах без синхронізації*. При цьому через меншу величину захисного відношення потужність заважаючих станцій може бути збільшена (наприклад, при Δf=0,015Гц - на 26 дБ!) без погіршення якості радіомовлення.

Одним із прийомів пристосування до умов спотворень (в областях зони помітних спотворень) є перемикання приймача із зовнішньої електричної антени на внутрішню магнітну або навпаки. Спотворення при цьому перемиканні усуваються, оскільки в полі стоячих хвиль точки мінімумів електричної та магнітної складових електромагнітного поля не збігаються. В точках мінімуму (вузла) електричної складової магнітна складова має максимум (пучок*). Тому для приймача з можливістю перемикання згаданих антен можна вважати, що зона спотворень практично відсутня.* Зрозуміло, що розглянутий прийом не є зручним при прийманні програм у русі. Неодмінна умова роботи передавачів мовлення у режимі фазового синхронізму залишається в силі.

Застосовуються два типи синхронних мереж - **одночастотні** та **багаточастотні**. Ідея багаточастотных мереж - така ж, як і у стільникових мережах.

Одночастотні мережі бувають ***однорідними*** та ***комбінованими***. Однорідні синхронні мережі, що складаються з передавачів однакової або близької за значенням потужності, використовуються для обслуговування мовленням районів з великою концентрацією населення. Між радіостанціями мережі на частині території з малою концентрацією населення допускається існування зони спотворень. Комбінована синхронна мережа складається з потужної опорної радіостанції та кількох малопотужних, розташованих у великих містах і призначених для підвищення напруженості поля з метою послаблення впливу індустріальних завад на якість прийому. На зараз у рамках СНД працює близько ***40*** синхронних мереж мовлення, у яких задіяно більше 150 радіомовних станцій.

2. Системи стереофонічного радіомовлення в діапазоні гектометрових хвиль (*рос.мовою*)

Стереофоническое радиовещание в диапазоне ГМВ (СВ) внедрено в некоторых странах (США, Канада, Япония и др.). Его преимуществом по сравнению со стереофоническим МВ-ЧМ радиовещанием, является большая площадь зоны обслуживания и меньшая чувствительность к многолучевому распространению радиоволн, что позволяет повысить устойчивость приема стереофонических программ в подвижных объектах (например, в автомобилях). К недостаткам следует отнести более узкий диапазон воспроизводимых частот (высшая модулирующая частота $F_в$ не превышает 10 кГц, в то время как при МВ-ЧМ вещании $F_в = 15$ кГц), а также больший уровень нелинейных искажений.

Системы стереофонического радиовещания в ГМВ (СВ) диапазоне должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- обладать совместимостью, т е. возможностью принять стереофонический сигнал в монорежиме с требуемым качеством при помощи обычного АМ радиоприемника;
- сохранять неизменной полосу частот радиоканала при работе передатчика в монофоническом и стереофоническом режимах

Наибольшее распространение среди разработанных систем стереофонического радиовещания в диапазоне СВ получили системы с квадратурной модуляцией. В них для передачи левого $Л(t)$ и правого $П(t)$ звуковых сигналов стереопары используются два АМ колебания с одинаковыми несущими частотами, но сдвинутыми по фазе на 90°.

Для упрощения анализа примем равными единице значения амплитуды A_0 несущего колебания $u_н(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \theta_0)$ и амплитуд $S_л$ и $S_п$ модулирующих сигналов левого $Л(t) = S_л \cos(\Omega_л t + \varphi_л)$ и правого $П(t) = S_п \cos(\Omega_п t + \varphi_п)$ каналов, т.е. $A_0 = S_л = S_п = 1$, а значения начальных фаз $\theta_0 = \varphi_л = \varphi_п = 0$. Здесь $\Omega_л$ и $\Omega_п$ — модулирующие угловые частоты звукового диапазона левого и правого каналов; ω_0 — угловая несущая частота.

С учетом этих допущений квадратурный стереофонический сигнал можно представить в виде

$$u(t) = (1 + m_л \cos \Omega_л t + m_п \cos \Omega_п t) \cos \omega_0 t + \\ + (m_л \cos \Omega_л t - m_п \cos \Omega_п t) \sin \omega_0 t, \qquad (16.19)$$

где $m_л$ и $m_п$ — коэффициенты модуляции левого и правого каналов. В выражении (16.19) первое слагаемое соответствует суммарному сигналу $M(t) = Л(t) + П(t)$, а второе — разностному $S(t) = Л(t) - П(t)$.

Выражение (16.19) можно преобразовать к виду

$$u(t) = A(t)\cos[\omega_0 t + \theta(t)], \qquad (16.20)$$

где

$$A(t) = \sqrt{(1 + m_л \cos\Omega_л t + m_п \cos\Omega_п t)^2 + (m_л \cos\Omega_л t - m_п \cos\Omega_п t)^2}; \qquad (16.21)$$

$$\theta(t) = \text{arctg}\,\frac{m_л \cos\Omega_л t - m_п \cos\Omega_п t}{1 + m_л \cos\Omega_л t + m_п \cos\Omega_п t}. \qquad (16.22)$$

Монофонический приемник при помощи амплитудного детектора выделяет огибающую $A(t)$.

В выражении (16.21) первое слагаемое под корнем соответствует неискаженной огибающей АМ сигнала (т.е. сигналу $M(t) = Л(t) + П(t)$), а второе слагаемое обусловливает нелинейные искажения, которые имеют место даже при использовании идеально линейного амплитудного детектора.

Нелинейные искажения можно уменьшить путем снижения коэффициентов модуляции $m_л$ и $m_п$. Однако это привело бы к уменьшению отношения сигнал/шум при приеме сигнала Поэтому применяют другие технические решения, описанные ниже.

Система фирмы Motorola. Фирма Motorola предложила систему, в которой несовместимая с АМ сигналами огибающая (16.21) заменяется огибающей вида

$$A'(t) = 1 + m_л \cos\Omega_л t + m_п \cos\Omega_п t.$$

Передающая часть системы (рис. 16.10,*а*) содержит суммарно-разностный преобразователь СРП, амплитудный модулятор М, генератор несущей частоты Г, фазовращатель Ф, осуществляющий сдвиг фазы несущего колебания, которое создается генератором Г, на 90°, балансный модулятор БМ, сумматор сигналов Σ, усилитель-ограничитель УО, необходимый для подавления амплитудной модуляции сигнала $u(t)$, передатчик, на один вход которого поступает суммарный сигнал $M(t) = Л(t) + П(t)$ с выхода СРП, а на другой — фазомодулированный (ФМ) сигнал с выхода УО.

По существу в системе Motorola на вход усилителя мощности передатчика поступает АМ-ФМ колебание вида

$$u(t) = (1 + m_л \cos\Omega_л + m_п \cos\Omega_п)\cos[\omega_0 t + \theta(t)], \qquad (16\ 23)$$

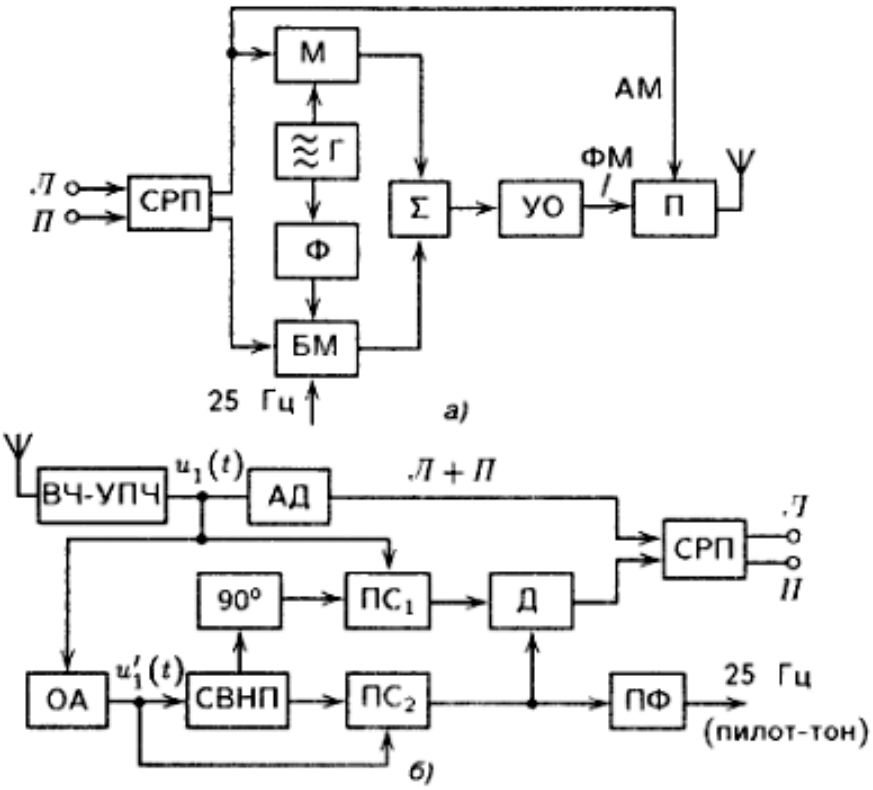


Рис. 16.10. Структурные схемы передающего (*а*) и приемного (*б*) трактов системы стереофонического радиовещания фирмы Motorola

где

$$\theta(t) = \operatorname{arctg} \frac{m_{\text{Л}} \cos \Omega_{\text{Л}} t - m_{\text{П}} \cos \Omega_{\text{П}} t}{1 + m_{\text{Л}} \cos \Omega_{\text{Л}} t + m_{\text{П}} \cos \Omega_{\text{П}} t}. \qquad (16.24)$$

Приемная часть (рис. 16.10,*б*) функционирует следующим образом. После прохождения принятого радиосигнала через тракт ВЧ-УПЧ и преобразования несущей частоты ω_0 в промежуточную $\omega_{\text{пр}}$ выражение для принятого сигнала можно представить в виде

$$u_1(t) = (1 + m_{\text{Л}} \cos \Omega_{\text{Л}} + m_{\text{П}} \cos \Omega_{\text{П}}) \cos[\omega_{\text{пр}} t + \theta(t)]. \qquad (16.25)$$

Этот сигнал поступает на вход амплитудного детектора. На выходе детектора образуется суммарный сигнал стереопары $M(t) = Л(t) + П(t)$. Кроме того, сигнал с выхода тракта ВЧ-УПЧ поступает на вход

усилителя-ограничителя амплитуды ОА. На его выходе формируется ФМ колебание вида

$$u_1'(t) \approx \cos[\omega_{\text{пр}} t + \theta(t)] = \cos\theta(t)\cos\omega_{\text{пр}} t - \sin\theta(t)\sin\omega_{\text{пр}} t. \quad (16.26)$$

С выхода ограничителя амплитуды ОА сигнал поступает на вход схемы выделения немодулированной несущей промежуточной частоты СВНП. Выделенное по этой схеме напряжение промежуточной частоты $\omega_{\text{пр}}$ подается на входы перемножителей сигналов ПС_1 и ПС_2 со сдвигом по фазе на 90°. На второй вход ПС_1 поступает напряжение сигнала $u_1(t)$, и после перемножения напряжений и подавления надтональных составляющих напряжение на выходе будет иметь вид

$$u_1(t)\sin\omega_{\text{пр}}(t) \approx (1 + m_{\text{л}}\cos\Omega_{\text{л}} t + m_{\text{п}}\cos\Omega_{\text{п}} t)\sin\theta(t). \quad (16.27)$$

На второй вход ПС2 подается напряжение сигнала $u_1'(t)$, и после перемножения напряжений и подавления надтональных составляющих получим выходное напряжение

$$u_1'(t)\cos\omega_{\text{пр}} t \approx \cos\theta(t). \quad (16.28)$$

В устройстве деления Д осуществляется деление напряжений, соответствующих выражениям (16.27) и (16.28). На выходе Д получим напряжение вида

$$u_{\text{выхД}} = (1 + m_{\text{л}}\cos\Omega_{\text{л}} t + m_{\text{п}}\cos\Omega_{\text{п}} t)\,\text{tg}\,\theta(t). \quad (16.29)$$

Подставим выражение (16.24) для θ(t) в (16.29). Учитывая, что $\text{tg}\,\text{arctg}\,X = X$, и произведя сокращения, получим выражение

$$u_{\text{вых д}} = m_{\text{л}}\cos\Omega_{\text{л}} t - m_{\text{п}}\cos\Omega_{\text{п}} t = S(t), \quad (16.30)$$

представляющее собой разностный сигнал. Далее сигналы $M(t)$ и $S(t)$ поступают на входы суммарно-разностного преобразователя СРП, в котором восстанавливаются сигналы стереопары $Л(t)$ и $П(t)$.

Фильтр ПФ предназначен для выделения пилот-тона, частота которого равна 25 Гц. При помощи пилот-тона обеспечивается функционирование схемы стереоиндикации.

Спектр стереофонического сигнала при модуляции по системе Motorola шире, чем спектр монофонического АМ сигнала, при том же значении высшей модулирующей частоты $F_{\text{в}}$.

Отношение сигнал/шум при стереоприеме ухудшается на 3 дБ по сравнению с моноприемом.

Система фирмы Harris. В передающем тракте, построенном по системе Harris (рис. 16.11,*а*), квадратурный сигнал получают путем балансной модуляции (в блоках $БМ_1$ и $БМ_2$) сигналами стереопары $Л(t)$ и $П(t)$ напряжений двух несущих, одинаковых по частоте, но сдвинутых по фазе при помощи фазовращателей Ф на углы $+\varphi$ и $-\varphi$ относительно напряжения задающего генератора.

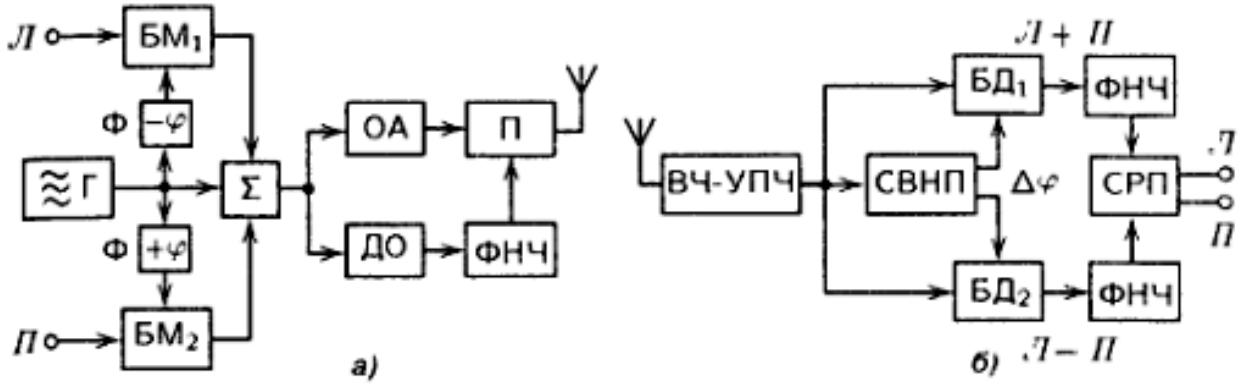


Рис. 16.11. Структурные схемы передающего (*а*) и приемного (*б*) трактов системы стереофонического радиовещания фирмы Harris

С выходов балансных модуляторов и задающего генератора Г напряжения поступают на входы сумматора Σ. На его выходе формируется напряжение вида

$$U(t) = \cos\omega_0 t + m_л \cos\Omega_л \cos(\omega_0 t - \varphi) + m_п \cos\Omega_п t \cos(\omega_0 t + \varphi). \quad (16.31)$$

Здесь приняты те же самые обозначения и допущения, что и ранее.

Используя тригонометрические формулы, выражение (16.31) можно преобразовать к виду

$$U(t) = [1 + (m_л \cos\Omega_л t + m_п \cos\Omega_п t)\cos\varphi]\cos\omega_0 t + \\ + [(m_л \cos\Omega_л t - m_п \cos\Omega_п t)\sin\varphi]\sin\omega_0 t. \quad (16.32)$$

Выражение (16.32) соответствует квадратурному колебанию. Изменяя параметр φ, можно устанавливать разные соотношения между суммарной и разностной компонентами стереосигнала. При $\varphi = 0$ второе слагаемое (16.32) равно нулю, и сигнал становится монофоническим. При $\varphi = 90°$ нулю равно первое слагаемое ($\cos 90° = 0$), и исчезает суммарный сигнал $M(t)$. При $\varphi = 45°$ присутствуют оба слагаемых в равной степени, и имеет место квадратурная модуляция.

К основным недостаткам обычной квадратурной модуляции следует отнести большой уровень нелинейных искажений, возникающих при детектировании такого сигнала. Расчеты показывают, что при $m_л = m_п = 0.3$ коэффициент гармоник $K_г = 8...10$ %. Это недопустимо много для радиовещания.

Уровень нелинейных искажений можно снизить путем уменьшения φ, однако это приводит к ухудшению отношения сигнал/шум при приеме. В одном из вариантов системы Harris принято значение $\varphi = 15°$, что позволяет снизить $K_г$ примерно в 10 раз, однако отношение сигнал/шум при этом ухудшается примерно на 11,7 дБ (в 3,85 раза) по сравнению с моноприемом.

Далее передаваемый стереофонический сигнал формируется следующим образом. Квадратурное колебание (16.32), полученное на выходе сумматора Σ, поступает на входы ограничителя амплитуды ОА и детектора огибающей ДО. К выходу последнего подключен фильтр нижних частот ФНЧ. Ограничитель амплитуды ОА предназначен для подавления амплитудной модуляции, и на его выходе создается ФМ колебание, фаза которого изменяется в соответствии с формулой (16.22). Выделенная при помощи ДО и ФНЧ огибающая квадратурного сигнала модулирует несущую частоту, в качестве которой используют ранее полученное с выхода ОА ФМ колебание.

Расширения полосы частот, занимаемых радиосигналом, при переходе передатчика РВС из моно- в стереорежим здесь практически не происходит.

Структурная схема приемного тракта представлена на рис. 16.11,*б*. После обработки в тракте ВЧ-УПЧ сигнал поступает на два балансных детектора $БД_1$ и $БД_2$, а также на схему выделения немодулированной промежуточной частоты СВНП. Полученное с выхода последнего блока напряжение с угловой частотой $\omega_{пр}$ поступает на вторые входы балансных детекторов со сдвигом по фазе на 90°. В результате на выходе $БД_1$ получаем суммарный сигнал $M(t) = Л(t) + П(t)$, а на выходе $БД_2$ — разностный $S(t) = Л(t) - П(t)$. После ФНЧ эти сигналы уравниваются по амплитуде и затем поступают на входы СРП. В этом устройстве восстанавливаются левый $Л(t)$ и правый $П(t)$ сигналы стереопары.

3. Особливості побудови мовних радіопередавачів із амплитудною модуляцією

Першою особливістю є спосіб реалізації модуляції. Амплітудна модуляція здійснюється, як правило у вихідному каскаді передавача (іноді – в двох останніх каскадах передавача), а не в збуджувачі, рис.9.4.

Рис.9.4.Структура мовного радіопередавача з амплітудною модуляцією

Причина полягає в дуже низькому ККД всього тракту підсилення модульованих коливань при формуванні модульованого коливання в збуджувачі). Оскільки мовні радіопередавачі мають потужність від сотень Вт до десятків і навіть сотень кВт, то енергетичні втрати внаслідок низького ККД є неприйнятними.

Другою причиною модуляції у вихідному каскаді виступає складність реалізації суворих вимог по нелінійним викривленням при підсиленні модульованих коливань в ТРЧ такого передавача.

Друга особливість. Оскільки при модуляції у вихідному каскаді від модулятора вимагається потужність, що порівняна з вихідною потужністю передавача, то у модуляторі (потужному підсилювачі звукової частоти) використовуються модуляторні лампи з високовольтним живленням анодно-екранних кіл. В такому підсилювачі набагато складніше реалізувати сувору АЧХ в смузі мовного сигналу (наприклад , в смузі 50 … 10000 Гц) у порівнянні з радіопередавачем систем зв'язку (із смугою частот 0,3 … 3,4 кГц).

Третя особливість полягає у суворому нормуванні позасмугових випромінювань передавача, що пояснюється необхідністю досить економічного використання частотного ресурсу, якого не вистачає. "Нарізка" робочих частот через 10 кГц вимагає суворого нормування позасмугових випромінювань. Допустимий рівень позасмугових випромінювань (для мовного сигналу в смузі 50 … 10000 Гц) нормується відповідно до ГОСТ 13924–80 згідно рис 7.4.

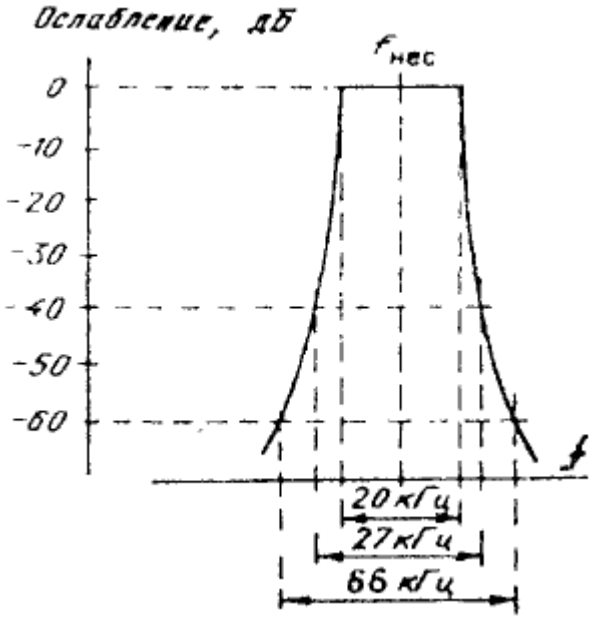


Рис.7.4 Шаблон вимог за рівнем придушення позасмугових випромінювань мовного передавача

Через вказані причини потужні мовні передавачі з амплітудною модуляцією проектуються переважно ламповими. Необхідна смуга частот (20 кГц) випромінювання повинна у двічі перевищувати верхню частоту мовного сигналу.

У них використовуються наступні способи амплітудної модуляції у вихідних каскадах :

0. На вхідний електрод (зміною напруги зміщення на керуючу сітку; в транзисторах – на базу),
1. На вихідний електрод (анод, колектор),
2. Комбіновані способи (анодно-сіткова , анодно- екранна й інші) модуляції.

Модуляція є нелінійним (чи параметричним) режимом роботи генератора з зовнішнім збудженням і тому можлива при змінному куті відсічки вихідного струму (в такт з модулюючим коливанням) .

Оскільки мовні передавачі працюють на фіксованих частотах, то у якості навантаження підсилювальних каскадів перевага надається резонансному, оскільки резонансні підсилювачі мають більший коефіцієнт підсилення у порівнянні з нерезонансним навантаженням.

Для забезпечення більшого ККД може використовуватися бігармонічний режим, що реалізується при навантаженні з двома резонансними контурами (один – на основну несучу частоту, а інший – на гармоніку коливання, що випромінюється).

В ряді країн (США, Канада , країни Латинської Америки , Японія і інші) ведеться регулярне **стереофонічне радіомовлення з амплітудною модуляцією на гектометрових хвилях. Основним аргументом в його користь є великий радіус зони обслуговування передавача і можливість стійкого приймання стереопередач в рухомому автомобілі**.

Недоліком стереофонічного радіомовлення з амплітудною модуляцією є більш вузький діапазон частот звукових сигналів, що відтворюються. Верхня частота звукового сигналу не перевищує 10 кГц. Однак, як показали дослідження, при оцінці звучання з шириною полоси 15 кГц в 5 балів звучання сигналів з полосою 10 кГц оцінюється в 4,5 балів. Втрата якості виявляється не дуже високою. Крім того, слухачі завжди надають перевагу стереофонічному відтворенню з полосою частот 10 кГц монофонічному з полосою 15 кГц.

Система стереофонічного радіомовлення з амплітудною модуляцією повинна:

- зберігати ширину смуги частот, що використовується радіосигналом при монофонічній передачі,

3. забезпечити сумісність з моноприйманням, тобто забезпечити можливість приймання стереофонічних радіосигналів звичайним монофонічним радіоприймачем з відповідною якістю,
4. збереження простоти (і відповідно дешевизни радіоприймального пристрою).

В процесі реалізації цих вимог в США розроблялись системи з подвійною модуляцією (амплітудна + фазова і амплітудна + частотна), система з двома роздільними бічними смугами , одна із яких служить для передачі лівого каналу **Л**, а інша – правого **П** і системи з квадратурною модуляцією. В теперішній час більшість передавачів працюють в одній системі з квадратурною модуляцією і , рідше, в системі з двома окремими бічними смугами (див.п.2).

4. Особливості радіомовних передавачів із кутовою модуляцією

В наш час отримали популярність мовні радіостанції інформаційно-музичного мовлення в метровому діапазоні частот, особливо – у професійних водіїв-автомобілів. Музика, що чергується з новинами, конкурсами і поздоровленнями вносить різноманіття в монотонний робочий ритм, заспокоює нерви водіїв. Більшість радіостанцій надають можливість подзвонити в прямий ефір і замовити пісню рідним, поздоровити з важливою подією і таке інше. Отримує реалізацію давня мрія журналістів і ЗМІ про інтерактивність передач.

Мовлення на метрових хвилях приваблює працівників радіомовлення і слухачів по наступним причинам:

5. суттєво менший рівень промислових завад,
6. є можливість передавати весь спектр чутних звуків, а не хвилюватися лише про розбірливість мови (як це має місце у декаметровому діапазоні), і на кінець,
7. є можливість мовлення в стереофонічному режимі; при цьому можливо отримати якість звуковідтворення, порівнювану з якістю магнітофону високого класу.
8. мовлення стає частиною бізнесу; мовні радіостанції можуть існувати за рахунок реклами, яку вони періодично озвучують.

Відповідно, співробітники станції покликані покращити якість і різноманіття передач, що транслюються, розширювати музичний архів. Музика передається на будь-який смак від ретро до техно.

Частоти, що рекомендовані для радіомовлення на метрових хвилях, представлені в Лекції №8. Кутова модуляція в цьому діапазоні має кращу завадостійкість (цьому сприяє і велика девіація частоти 50 і 75 кГц) у порівнянні з амплітудною модуляцією, а радіолінія з кутовою модуляцією – більш високу енергетику (радіопередавач завжди віддає максимальну потужність).

Однак, необхідно відмітити, що робота мовних станцій з кутовою модуляцією в метровому діапазоні в міських умовах може супроводжуватися замираннями сигналу і нелінійними викривленнями, обумовленими відбиттям радіохвиль від будівель із залізобетонними й стальними конструкціями.

Способи реалізації кутової модуляції детально викладені у посібниках по радіопередавальним пристроям.

Питання для самоконтролю

1. Аргументуйте фактори, що впливають на величину захисного відношення. Чому захисне відношення залежить від планування частотного ресурсу мережі мовлення (одночастотна, багаточастотна, синхронна)? Чому величина захисного відношення різна для моно- і стереомовних передач?
2. Аргументуйте доцільність синхронних мереж мовлення.
3. Аргументуйте труднощі створення синхронних мереж мовлення і способи подолання цих труднощів.
4. Аргументуйте параметри систем мовлення, необхідні для проектування та планування цифрової мережі мовлення.
5. Аргументуйте залежність площі зони обслуговування мовної радіостанції від захисного відношення. Що розуміється під захисним відношенням на звуковій і радіочастоті ?
6. Аргументуйте економічну доцільність трикутної форми сітки територіального планування мовної мережі перед квадратною.
7. Сформулюйте основні переваги синхронних мовних мереж.
8. Аргументуйте основні недоліки синхронних мовних мереж.
9. До яких наслідків призводить асинхронізм несущих частот радіопередавачів? Аргументуйте важливість синхронізації несущих коливань мовних передавачів.
10. Аргументуйте способи підтримки синхронізму в мережі мовних радіопередавачів.
11. Аргументуйте особливості побудови мовних радіопередавачів з амплітудною модуляцією.
12. Аргументуйте, чим обумовлені суворі норми на позасмугові випромінювання мовних радіопередавачів з амплітудною модуляцією.

ДОДАТОК 3. РИСУНКИ ДО ЛЕКЦІЇ №9

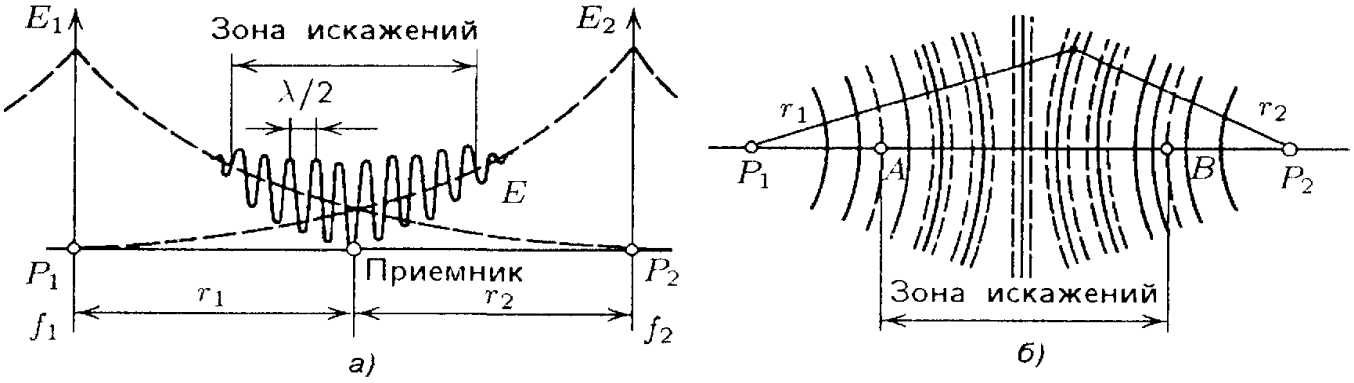


Рис.10.2. Искажения при работе двух передатчиков в сети синхронного радиовещания: а — интерференционная структура электромагнитного поля в зоне искажений; *б* — участки хорошего и плохого радиоприема

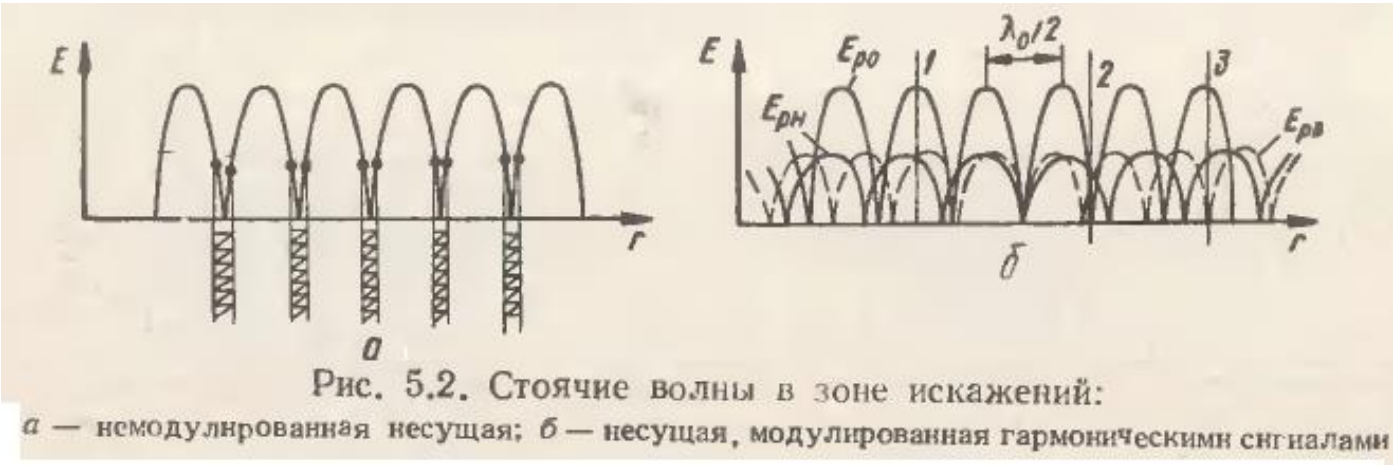


Рис. 5.2. Стоячие волны в зоне искажений:
а — немодулнрованная несущая; *б* — несущая, модулированная гармоническими сигналами

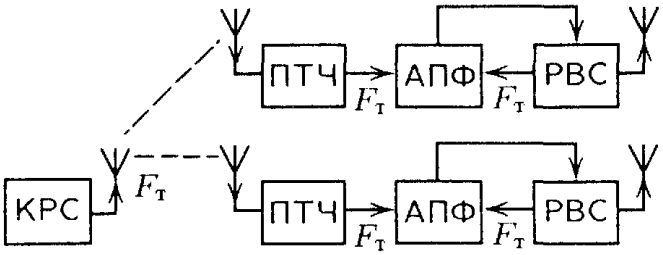


Рис.10.1 Схема фазовой синхронизации РВС

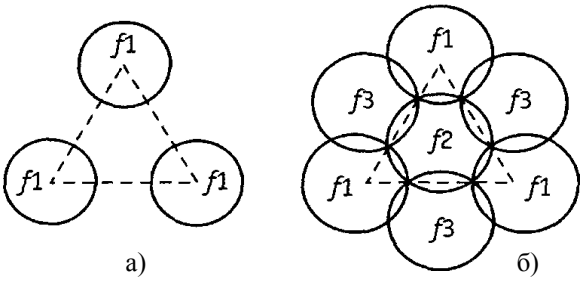


Рис.10.3. Построение синхронной сети:
а – одноволновой; б – многоволновой

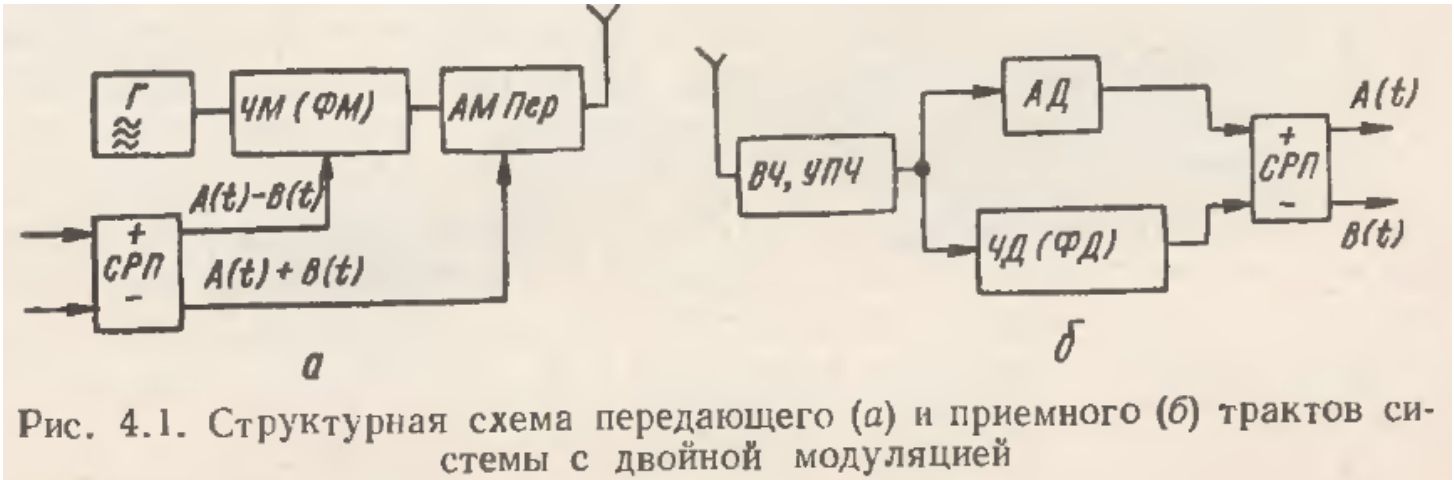


Рис. 4.1. Структурная схема передающего (*а*) и приемного (*б*) трактов системы с двойной модуляцией

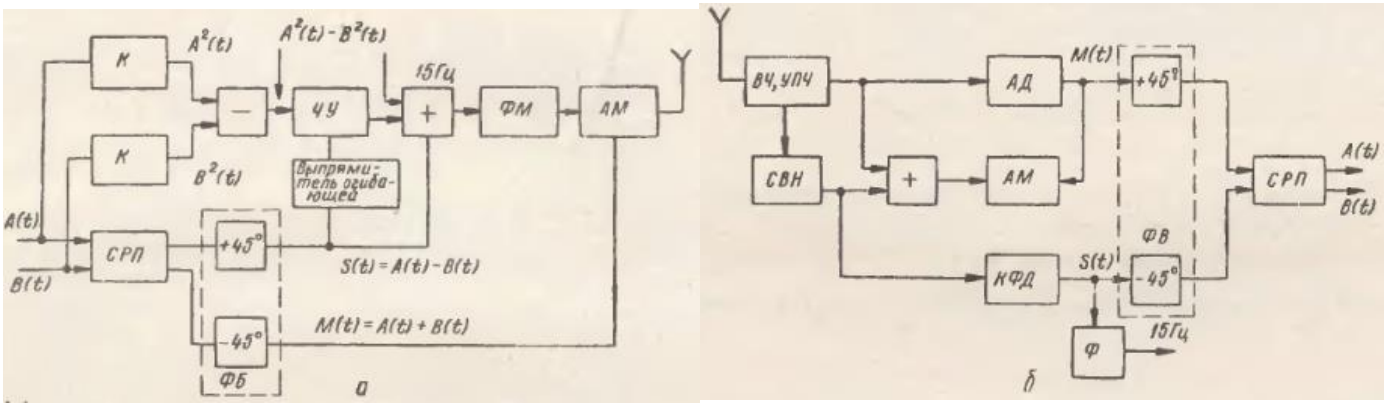


Рис.4.2 Структурная схема передающего (а) и приёмного (б) трактов системы стереофонического радиовещания фирмы «Kahn»

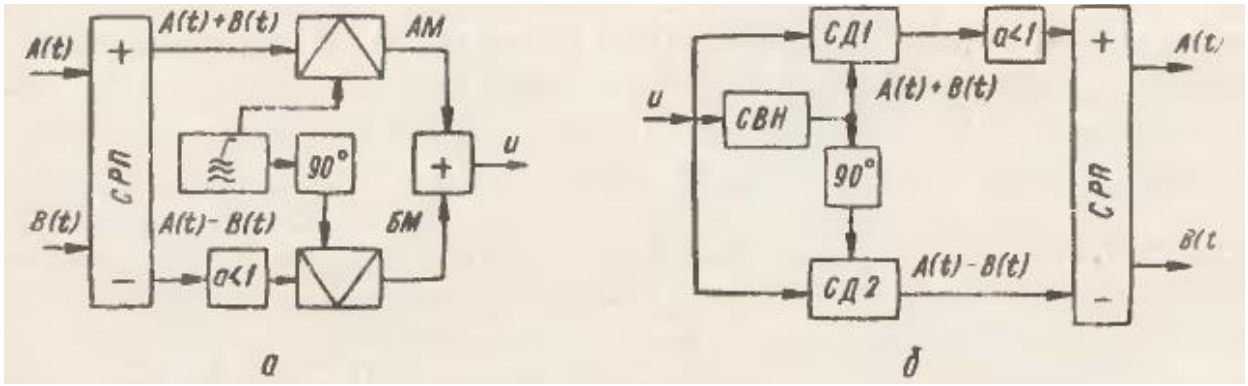


Рис.4.3 Структурная схема передающего (а) и приёмного (б) трактов системы стереофонического радиовещания с с квадратурной модуляцией

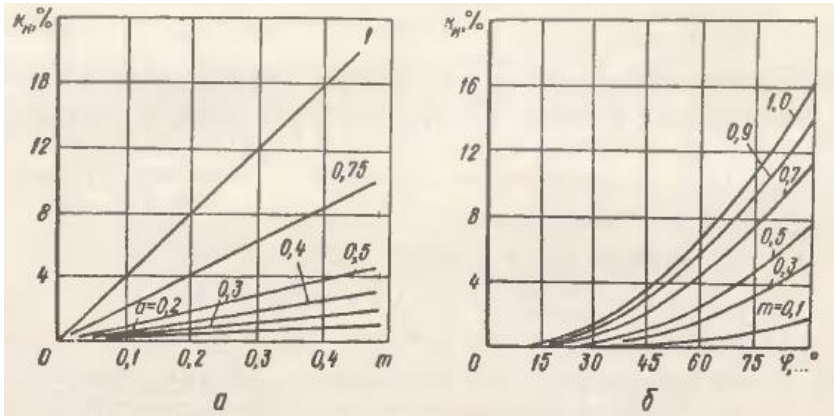
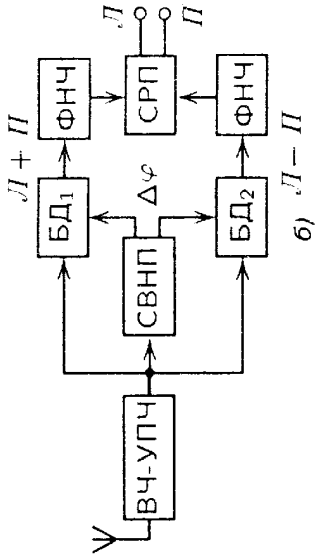


Рис.4.4 Зависимость коэффициента нелинейных искажений от коэффициента модуляции m при φ=90 и разных значениях амплитуды разностного сигнала (a≤1) (а); зависимость $k_н$ от значения угла φ между несущими (б)



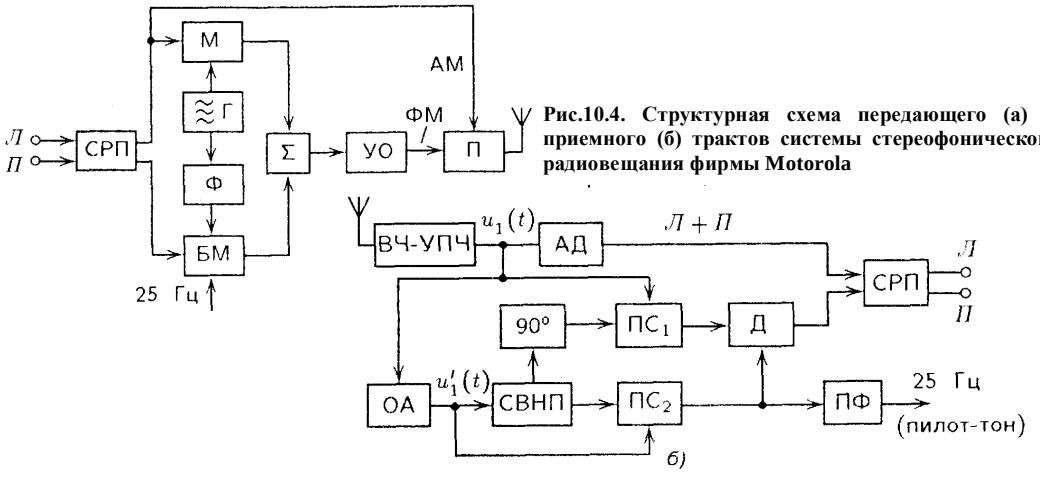


Рис.10.4. Структурная схема передающего (а) и приемного (б) трактов системы стереофонического радиовещания фирмы Motorola

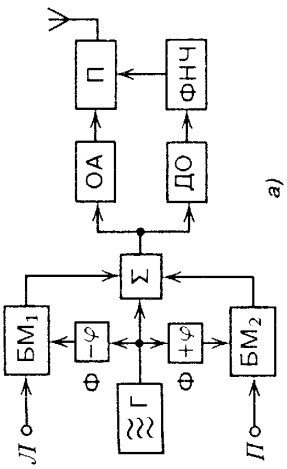


Рис.10.5. Структурная схема передающего (а) и приемного трактов (б) системы стереофонического радиовещания фирмы Harris

ЛЕКЦІЯ №10 СИСТЕМИ СТЕРЕОФОНІЧНОГО РАДІОМОВЛЕННЯ В ДІАПАЗОНІ МЕТРОВИХ ХВИЛЬ

ЛІТЕРАТУРА:

1. Брагин А.С. Технологиивещательных служб. Часть 1. Технологии звукового радиовещания. –К.: НТУУ «КПИ», 2006.
2. Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов./Под ред. Ю. А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком., Радио и связь, 2007. – 872 с.

РОЗДАТНИЙ МАТЕРІАЛ: див. ДОДАТОК З

1. Особливості систем стереофонічного радіомовлення в діапазоні метрових хвиль

МСЕ-Р для організації звичайного (лівий – **Л** і правий **П** канали мовного сигналу) стереофонічного радіомовлення в метровому діапазоні частот рекомендовані три системи :

- з полярною модуляцією (СРСР) ,
- з пілот –тоном (США, Європа) і
- більш пізня ЧМ-ЧМ (Скандинавія , Японія і інші),

хоча до 50-х років минулого століття було запропоновано більше 20 систем стереофонічного мовлення.

Вибір тієї чи іншої системи визначається вимогами, що висуваються до них. Наприклад, необхідно забезпечити пряму і зворотну сумісність і мінімальне (у порівнянні з моноприйманням) зменшення зони впевненого стереоприймання.

Пряма сумісність полягає у наданні радіослухачу можливості приймати стереофонічну передачу на звичайний “монофонічний” радіоприймач (зрозуміло у монозвучанні), а зворотна – у прийманні на стереофонічний приймач звичайної передачі без втрати якості (і звичайно, без стереофонічного ефекту).

Крім того, система повинна допускати можливість використання для стереофонічного мовлення вже встановлених радіопередавачів для монопередачі (при умові доукомплектування необхідної апаратури для модуляції). Ця вимога обумовлена економічними міркуваннями.

2. Система стереофонічного мовлення з полярною модуляцією

Система ЧМ-АМ з полярною модуляцією (ПМ) описана у 1939 р. А.І.Косцовим і впроваджена в СРСР у 50-х роках завдяки роботам проф. Л.М.Кононовича. Перша передача відбулася в Ленінграді 6 січня 1960 р . У відповідності з Рекомендацією МККР 450 (1966 р.) рекомендована до використання.

Для отримання сумісності моно- і стереосистем використовується спосіб , при якому сигнали лівого і правого каналів (**Л** і **П**) перетворюються з допомогою перетворювача в сигнали **Л** + **П** і **Л** – **П**, рис.10.1.

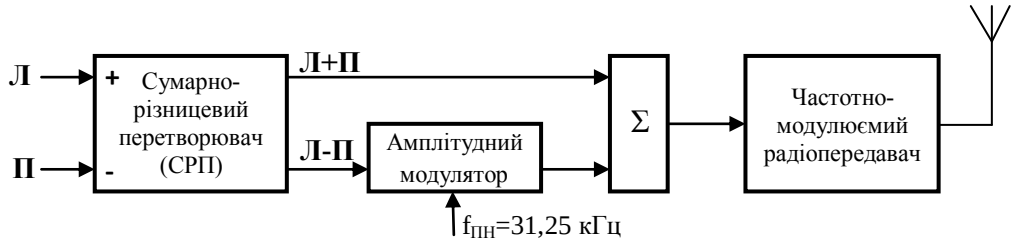


Рис.10.1. Схема модуляції полярно-модульованим сигналом

Сигналом **Л** – **П** здійснюється амплітудна модуляція надтональної піднесучої частоти $f_{пн}$=31,25 кГц. Потім модульований сигнал піднесучої сумується з сигналом (**Л**+**П**) і отриманою сумою здійснюється кутова модуляція мовного радіопередавача метрового (чи дециметрового) діапазону. Величина піднесучої вибрана не випадково: вона дорівнює подвоєній строковій частоті 15,626 кГц стандарту телебачення (як відомо телевізійне зображення передається зі звуковим супроводом).

Спектр сигналу, що модулює, для мовного радіопередавача зображений на рис.10.2,а. Часова діаграма має вигляд рис 10.2,б.

Доведемо (як видно з рис 10.2,б), що обвідна позитивних півперіодів змінюється у відповідності з сигналом лівого каналу **Л**(t), а обвідна від'ємних (полярно протилежних, що відобразилося у назві системи) півперіодів – у відповідності з сигналом правого мовного каналу **П**(t).

У відповідності з алгоритмом формування (див. рис. 7.5) рівняння полярно модульованого коливання має вигляд :

$$U_{ПМ}(t) = [U_Л \sin\Omega_Л t + U_П \sin\Omega_П t] + [U_{ПН} + U_Л \sin\Omega_Л t - U_П \sin\Omega_П t] \sin\omega_{ПН} t, \qquad (10.1)$$

де $\omega_{ПН} = 2\pi f_н$, а $U_{ПН}$ - амплітуда піднесучої.

Для наочності виведення зроблено для випадку модуляції піднесучої гармонічним коливанням з частотою $\Omega_Л$ і $\Omega_П$ відповідно.

В цьому виразі перший доданок в квадратних дужках є сумою сигналів **Л** і **П** , а другий – амплітудо-модульованим коливанням піднесучої.

Якщо взяти $\sin\omega_{ПН} t = 1$, то отримаємо верхню обвідну півперіодів полярно-модульованого коливання $U_{ПН} + 2U_Л \sin\Omega_Л t$, а беручи $\sin\omega_{ПН} t = -1$, отримаємо обвідну нижніх півперіодів $-U_{ПН} + 2U_П \sin\Omega_П t$.

Максимально допустимі коефіцієнти амплітудної модуляції взяті рівними $M_Л = M_Н = 0{,}8$ (для підтримання середнього значення девіації частоти радіопередавача) а діапазон звукових частот – від 30 до 15000 Гц. Полярно-модульований сигнал займає полосу частот 30 … 46250 Гц.

Максимальна девіація частоти несучої передавача вибрана такою ж як і для монофонічного сигналу ($\Delta f_{дев} = 50$ кГц перевищення неприпустимо). При цьому парціальні девіації від сумарного і різницевого сигналів повинні бути однаковими.

Варіант перемикання в радіоприймачі з режиму ”моно” в режим “стерео” і найпростіший демодулятор представлені на рис.10.3.

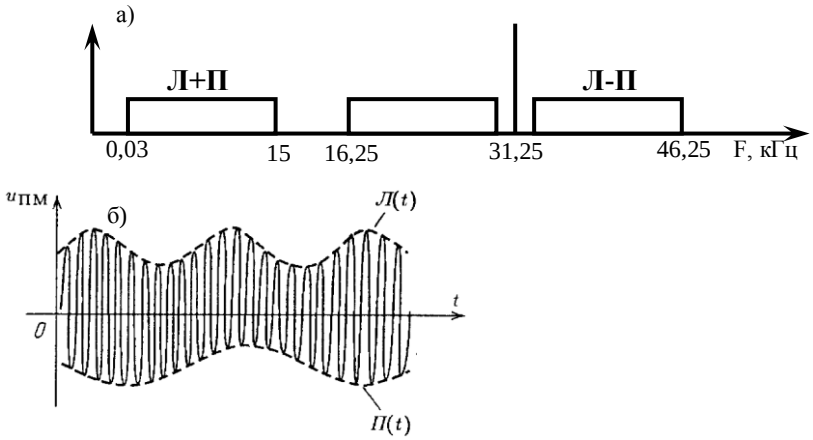


Рис.10.2. Спектр (а) і часова діаграма полярно-модульованого сигналу (б)

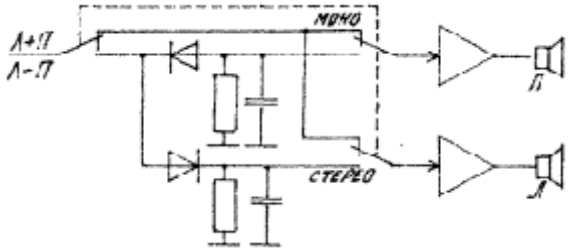


Рис.10.3. Найпростіший демодулятор полярно модульованого сигналу

В режимі ”стерео” один діод виділяє обвідну позитивних півперіодів , а інший – обвідну від’ємних. Незважаючи на зовнішню подібність процес демодуляції відрізняється від звичайної демодуляції мовних сигналів з амплітудною модуляцією. Внаслідок того, що полярно-модульована піднесуча має частоту, що несуттєво відрізняється від верхньої модулюючої частоти, а при демодуляції сигналів одного каналу, в якому модульоване коливання залежить від миттєвого значення сигналу іншого каналу, якість стереомовного приймання виявляється неідеальною. Тому у високоякісних приймачах схема рис.7.7. не використовується .

Зауваження. Тут доцільно додати, для яких цілей передаються **Л + П** і **Л – П**. Монофонічний приймач може відтворити лише звукову (низькочастотну) частину спектру полярно-модульованого коливання . *Якщо в області звукових частот передавати лише сигнал* **Л** (чи лише **П**), *то звуковідтворення буде неповноцінним, оскільки містить інформацію лише про ліву (або лише праву) частину сцени.* Щоб задовольнити вимогу сумісності, в смузі звукових частот передається сума сигналів **Л + П** , а в діапазоні ультразвукових частот (на піднесучій) – інформація про різницевий сигнал **Л –П** .

Більш якісна демодуляція здійснюється в схемі з розділенням спектру, рис.10.4.

Після частотного демодулятора стереофонічного приймача сигнали попередньо розділяються на низькочастотну і високочастотну частини відповідно фільтром нижніх частот і смуговим фільтром. Сумарний сигнал безпосередньо, а різницевий після амплітудного демодулятора поступає на

сумарно-різницевий перетворювач (СРП), в якому здійснюється розділення сигналів **Л** і **П**:

$$(\mathbf{Л} + \mathbf{П})+(\mathbf{Л} - \mathbf{П})=2\mathbf{Л} \quad \text{і} \quad (\mathbf{Л} + \mathbf{П})-(\mathbf{Л} - \mathbf{П})=2\mathbf{П}.$$

Далі сигнали **Л** і **П** підсилюються (на рисунку не показано, див. аналогічно рис.10.1.) і поступають на гучномовці.

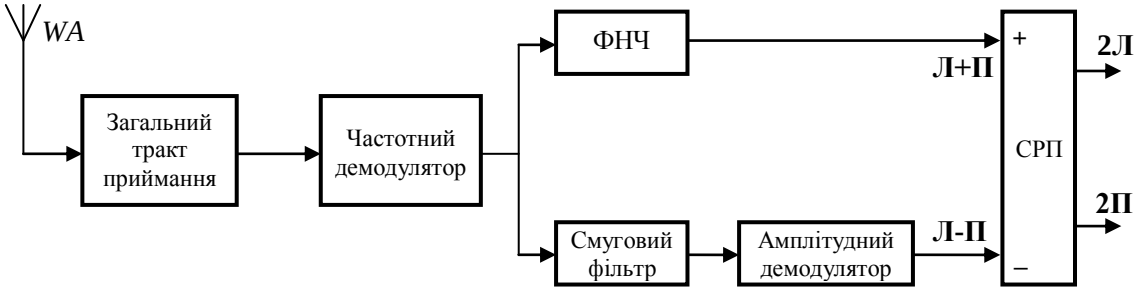


Рис.10.4.Схема приймача полярно-модульованих сигналів.

Однак у подальшому схеми рис 10.1 і 10.4. були модернізовані.

З виразу (10.1) можна визначити, яку частину напруги полярно модульованого коливання містить піднесуча. Для $M_Л=M_П=0{,}8$ знайдено , що на передачу піднесучої використовується 55,5 % девіації частоти, а на долю корисного (сумарного і різницевого) коливання лише 44,5 %. Це викликає зниження рівня гучності передачі при прийманні на звичайний (моно) мовний приймач на 7 дБ, що є порушенням принципу сумісності систем моно і стерео.

Для того, щоб девіація несучої радіопередавача використовувалась ефективно, амплітуду піднесучої в спектрі полярно-модульованого коливання подавляється у 5 разів (на **14** дБ). У стереофонічному приймачі для демодуляції складової Л – П, що не має викривлень, рівень піднесучої повинен бути відновлений (!).

В цьому випадку забезпечується майже повна сумісність: зменшення гучності приймання стереопередачі у порівнянні з монофонічною програмою складає 2 дБ , що майже непомітно для людського вуха.

Спектр полярно-модульованого коливання з частково подавленою піднесучою приведений на рис.10.5. Для наочності зверху повторений спектр з подавленою піднесучою, рис.10.2,а.

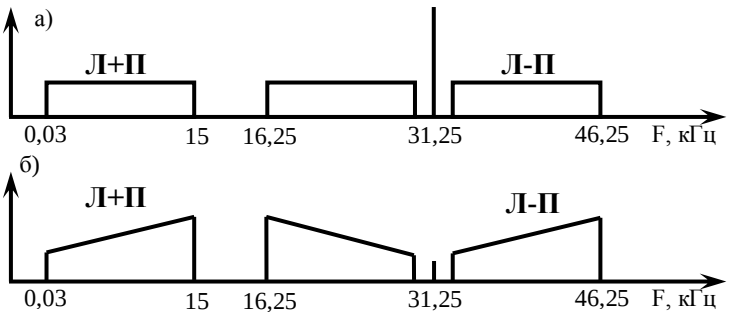


Рис.10.5. Спектр комплексного стерео приймача

Рис.10.6,а відображає структуру тракту передачі (див. відмінності від рис.10.1), а рис.10.6,б – структуру тракту приймання комплексного стереосигналу (КСС), див. рис.10.4.

Придушення піднесучої $f_{під} = 31{,}25$ кГц на 14 дБ дозволяє зменшити девіацію частоти передавача до 20 % від максимальної девіації частоти (тобто девіація лише на піднесучу частоту складає 10 кГц від сумарної девіації 50 кГц). Відповідно, додатково зменшується ширина спектру випромінювання.

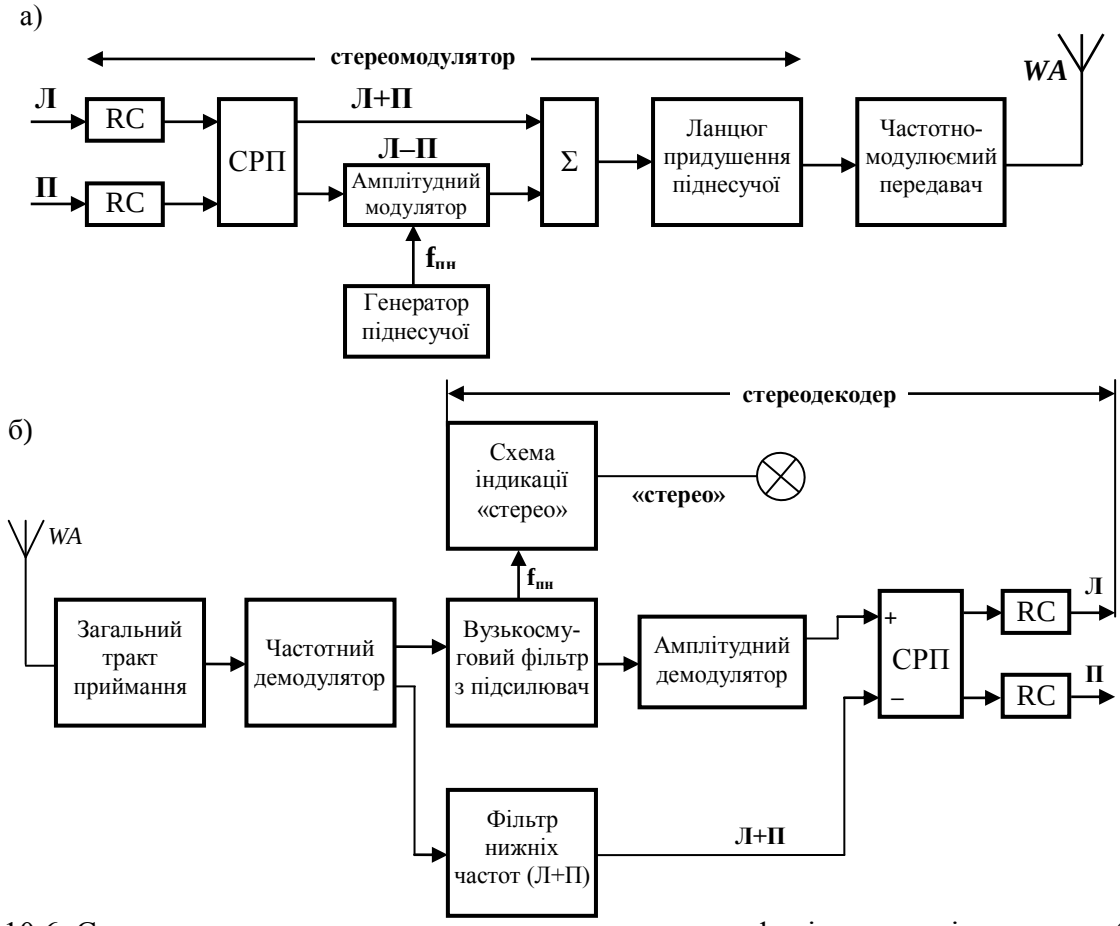


Рис.10.6. Структура передавального тракту системи стереофонічного радіомовлення (а) і схема тракту приймання комплексного стереосигналу (б)

В стереофонічному радіоприймачі частково подавлена піднесуча відновлюється за допомогою спеціального контура, схема і коефіцієнт передачі якого представлені на рис.10.8,в.

Існують й інші схеми демодуляції прийнятого комплексного стерео сигналу (часто називані стереокодерами) , наприклад стереокодери з часовим розділенням каналів **Л + П** і **Л – П**, іноді називані синхронним полярним декодером, а також цифрові схеми стереокодерів.

При наявності відновленого (до необхідного рівня) піднесущого коливання користувач отримує інформацію про режим ”стерео” (по світінню індикатора).

На рис.10.5. звертає увагу накреслений низькочастотний сумарний сигнал **Л + П** і бічних смуг на піднесучій (з підійманням рівня верхніх частот мовного сигналу). Необхідність підіймання рівня верхніх модулюючих частот у

порівнянні із середніми аргументується тим, що рівень спектральних складових верхніх частот суттєво нижчий, ніж середніх і зменшується з ростом частоти.

Відповідно, індекс кутової модуляції (від якого залежить завадостійкість приймання) на верхніх модулюючих частотах буде нижчий аніж на верхніх. Тому для вирівнювання завадостійкості, як і у професійних (зв'язних) передавачах **передбачаються передвикривлення**. Верхні модулюючі частоти штучно "піднімаються" в тракті передачі до частотного модулятора, а у приймачі – штучно компенсуються. Вузол "передвикривлень" на схемі рис.10.7 позначений як RC. Схема RC-кола передвикривлень та її характеристика наведені на рис.10.7.

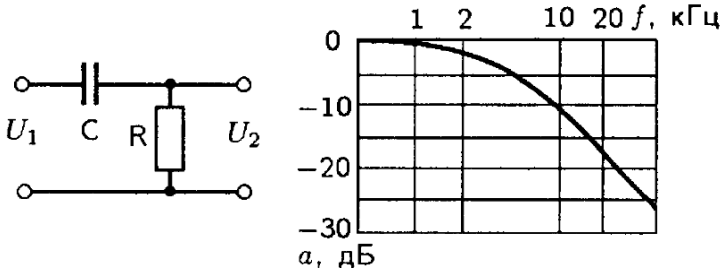


Рис.10.7 Схема передвикривлень і її характеристика.

Параметри цього кола стандартизовані: величина RC = 50 мкс. Суворе нормування передбачене для того, щоб її відновлення на приймальній стороні не викликало складностей.

Також нормовано й параметри кола ослаблення рівня піднесучої в тракті передачі (R1, R2 і режекторний контур LC суворо з добротністю Q=100, рис.10.8,а) і параметри кола відновлення піднесучої у тракті приймання (рис.10.8,б) .

Мовний сигнал з передвикривленнями в трактах **Л** і **П** і з частково придушеною піднесучою на 14 дБ отримав назву **комплексного стереосигнала.**

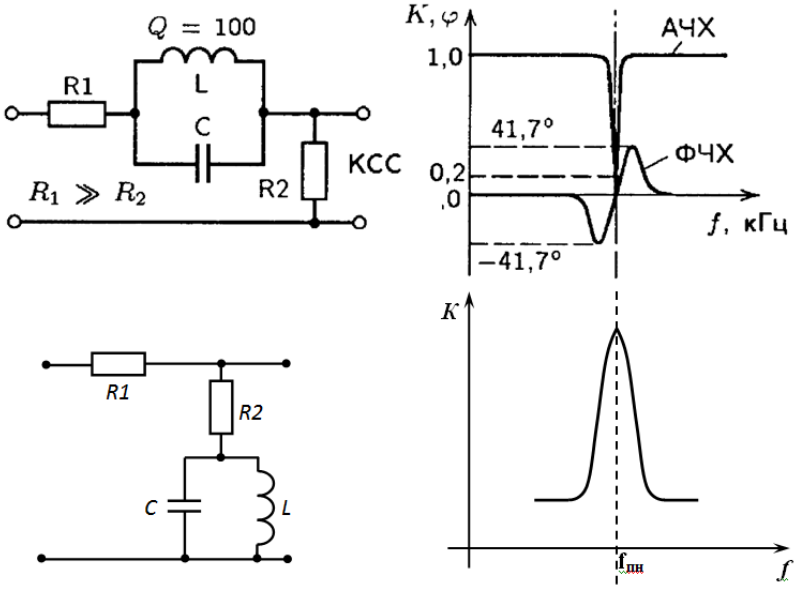


Рис.10.8. Схеми кола придушення піднесучої (а) , відновлення піднесучої в радіоприймачі (б) і їх характеристики

3. Система стереомовлення з пілот – сигналом

Американська система ЧМ–АМ з пілот-сигналом розроблена інженерами фірми Zenit-General Electric в кінці 50-х років і використовується для регулярного мовлення з 1961 р. Рекомендована до використання МККР (Рекомендація 450, 1966 р.).

В системі з пілот-сигналом також формується комплексний стерео сигнал, його спектр також містить дві частини – низькочастотну (суму **Л** + **П** сигналів стереопари) і надтональну – амплітудно-модульоване коливання сигналом (**Л-П**) *з повністю придушеною піднесучою* $f_{пн} = 38\ кГц$, рис.10.9,а. Подавлення піднесучої суттєво покращує енергетичні показники системи.

Модуляція її по амплітуді також здійснюється різницевим сигналом **Л – П** (фактично сигнал формується після балансного модулятора , на виході якого при повній симетрії коливання піднесучої частоти, що модулюється, відсутнє).

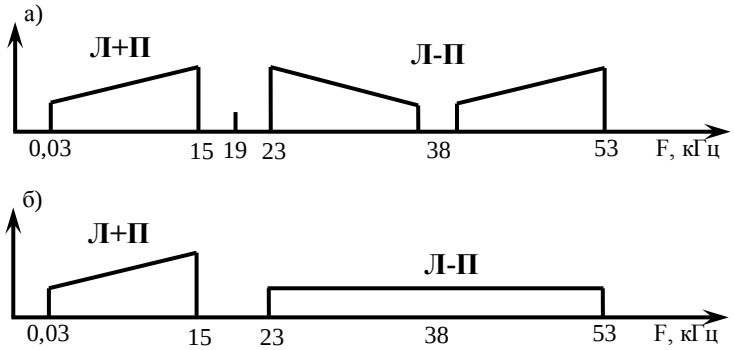


Рис.10.9.Спектри стерео сигналів з пілот-тоном (а) і системи ЧМ-ЧМ (б)

Зменшення гучності при прийманні на монофонічний приймач в системі з пілот-синалом складає всього 1 дБ.

Щоб мати можливість точно відновлювати частоту піднесучої $f_{пн} = 38\ кГц$ на приймальній стороні системи, в спектрі КСС додатково введений пілот-сигнал з частотою 19 кГц, що передається з рівнем в 10 разів нижчим від номінального. Схема відновлення (придушеної в передавачі) місцевої несучої в приймачі з використанням фазового автоматичного підстроювання частоти ускладнює останній.

Як видно із порівняння принципів формування мовних радіосигналів, приймач сигналів з полярною модуляцією (традиційна назва ”ЧМ мовлення”) неможна використати для приймання сигналів з пілот-сигналом (традиційна назва ”FM мовлення”). Обидві системи близькі по структурі і параметрам.

4. Система стереомовлення з ЧМ-ЧМ

Шведська система формування комплексного стерео сигналу відрізняється від розглянутих вище вітчизняної і американської тим , що модуляція піднесучої ($f_{пн} = 38\ кГц$) різницевим сигналом **Л–П** здійснюється не за

амплітудою , а за частотою. Розміщення спектра сигналів стереопари показано на рис 10.9.б.

Другий частотний модулятор знаходиться у мовному радіопередавачі, звідси і походить назва системи. Крім того, сигнал **Л – П** для підвищення його завадостійкості підлягає компандуванню (до першого модулятора включений компресор , а стереодекодер містить експандер).

Відмітимо, що існують ключові стереодекодери, що мають кращі параметри. А саме, вони не вимагають обов'язкового перетворення комплексного стереосигналу (на приймальному кінці) у поляр-но-модульований сигнал для наступної демодуляції, що є його безперечною перевагою.

Система ЧМ-ЧМ відрізняється кращою завадостійкістю, забезпечує більш високе перехідне затухання між низькочастотною (**Л** + **П**) і надтональною частинами КСС, ніж системи АМ-ЧМ. Останнє дозволяє використовувати її для передачі двох окремих монофонічних сигналів.

Її недоліком є більша складність і, як наслідок, більш висока вартість радіоприймального пристрою. Для масового користувача це має суттєве значення.

Всі три описані системи стереомовлення один з одним не сумісні, а при прийманні сигналів моно передачі – сумісні.

Особливістю розглянутих вище систем є помітне зменшення величини зони обслуговування при переході передавача з монофонічного мовлення на стереофонічне. Цього недоліку позбавлена система **FMX** (Extended Range FM Stereo System ,США).

Вона сумісна з системою пілот-тону і дозволяє розширити зону високоякісного стереоприймання (при відношенні сигнал/шум 50 дБ) практично до розмірів зони обслуговування передавача, що працює в режимі монопередачі . *Розширення зони обслуговування досягається використанням оригінальної системи адаптивного компандування різницевого сигналу, який передається в додатковому каналі на піднесучій частоті.*

Компресований сигнал передається у вигляді коливання з балансною модуляцією (як й при звичайній стереопередачі з пілот-тоном – на піднесучій частоті 38 кГц) , але у квадратурі з основною складовою. Звичайні стереодекодери на квадратурну складову не реагують, чим і досягається сумісність обох систем. Мовні передавачі системи FMX оснащуються спеціальним декодером і пристроєм перемикання в режим FMX, що спрацьовує від спеціального інфразвукового сигналу (що передається у тому ж квадратурному каналі).

Серед аналогових систем радіомовлення якість мовлення лише у метровому діапазоні частот наближається до якості звучання програвачів компакт-дисків (CD). Міра наближення якісних характеристик цих систем видна з даних табл.10.1., де приведені основні параметри якості, яким згідно **ГОСТ 5651-90** повинні відповідати радіоприймачі "ЧМ мовлення".

Підвищення вимог до якості “ЧМ мовлення” веде до суттєвого подорожчання приймальної апаратури, що непорівнянне із досягнутим результатом. Тому на практиці граничні вимоги досягаються лише у дорогих висококласних тюнерах. У масовій апаратурі досягти граничних показників якості не вдається.

Збільшення девіації частоти у передавачі могло б сприяти покращенню якісних показників побутових радіоприймачів, але цей шлях веде до розширення смуги частот мовного радіоканалу і нераціональному використанню національного радіочастотного ресурсу.

Табл.10.1. Основні параметри якості ОВЧ ЧМ радіоприймачів у порівнянні з компакт-диском

Параметр якості	**Радіоприймач ЧМ мовлення**	**Компакт-диск**
Діапазон частот, що відтворюється, Гц, не вужче	10…12500	20…20000
Нерівномірність АЧХ в номінальному діапазоні частот, що відтворюються, дБ	1,5…3	0,05
Коефіцієнт гармонік, %	0,3…3	0,0015
Перехідне затухання між стереоканалами на частоті 1000 Гц, дБ	50…30	110
Відношення сигнал/шум в стереорежимі, дБ, не менше	60…46	116
Динамічний діапазон	–	100…112

Крім того, забезпечити високоякісне стереофонічне приймання можливе лише в стаціонарних умовах і з орієнтованою (направленою на мовну станцію) антеною.

Але і в цьому випадку користувацькі характеристики радіоприймачів “ЧМ мовлення”, що досягаються, помітно поступаються однойменним характеристикам сучасної цифрової звукотехніки.

На закінчення здається доцільним представити порівняльні відомості з **ГОСТ 18633-80** “Системи стереофонічного радіомовлення. Основні параметри “ і Рекомендації МСЄ-Р 450-2, табл.10.2.

5. Реалізація вимог до каналу радіомовлення

Смуга частот радіосигналу. При знаходженні смуги частот мовного радіоканалу для визначеності можна скористатися однією із емпіричних формул Е.І.Манаєва

$$\Delta F_{сигн} \approx 2(\Delta f_{дев} + F_{макс}),$$

де $\Delta f_{дев}$ - максимальна девіація частоти несущої радіопередавача,

$F_{макс}$ - максимальна частота модулюючого сигналу.

При звичайній монофонічній радіопередачі $\Delta f_{дев}=50$ кГц і $F_в=F_{макс}=15$ кГц величина $\Delta F_{сигн}$ складе 130 кГц.

Таблиця 10.2. Порівняльні характеристики стереосистем із полярною модуляцією і із пілот-сигналом

Параметри	Система	
	З полярною модуляцією	**З пілот-сигналом**
Діапазон звукових частот кожного каналу стереопари, Гц	31,5…15000	31,5…15000
Відхилення АЧХ каналів стереопари в усьому діапазоні частот не більше ніж, дБ	±1	±1
Відношення сигнал/шум не гірше, дБ	65	65
Коефіцієнт гармонік не більше, %		
в смузі 100…10000 Гц	1	
в смузі 30…15000 Гц	1,5…2	
Нестабільність частоти передавача не більше	$5\pm2\cdot10^{-5}$	
Коефіцієнт часткового придушення несучої	5 (14 дБ)	>100 (> 40 дБ)
Максимальний коефіцієнт модуляції КСС не більш, %	80	90
Верхня гранична частота спектру КСС, кГц	46,25	53
Добротність контуру придушення піднесучої	100±5	
Постійна часу ланцюга перед викривлень сигналів стереопари, мкс	50	50 (Європа) 75 (США)
Максимальна девіація частоти передавача не більше, кГц	50±4	75±4
Максимальна девіація несучої частоти залишком частково придушеної піднесучої або пілот-тоном відносно її максимального значення, %	20	8…10
Смуга частот радіоканалу передавача не менше, кГц (на рівні - 30 дБ)	192,5	206 (Європа) 256 (США)
Максимально допустима ширина смуги частот радіоканалу приймача, кГц	140	210
Перехідне затухання між каналами стереопари не менше, дБ на частотах		

1000, 125, 400, 5000, 10000	50 40	50 40
Погіршення захисних відношень у порівнянні з монофонічною передачею, дБ	24,7	23
Мінімально використовувана напруженість поля дБ(мкВ/м) в районах:		
сільських	55	55
міських	66	66
Великих містах	74	74
Захисні відношення по радіочастоті, дБ, при використанні максимальної девіації частоти ±75 (±50) кГц та рознесенні частот несучих, що дорівнює, кГц		
0	37…45 (41…49)	
50	43…51 (43…51)	
100	37…45 (25…33)	
200	7 (7)	
300	-2 (-7)	
400	-20 (-20)	
Можливість безпосереднього використання ТВ-мовлення	имеется	нет

При стереофонічній передачі і $\Delta fдев = 50$ кГц : в системі з полярною модуляцією $Fмакс = (Fпн + Fв) = (31{,}25 + 15) = 46{,}25$ кГц, а в системі з пілот-сигналом $Fмакс = 53$ кГц , що відповідає ширині спектра відповідно $\Delta Fсигн \approx 192{,}5$ кГц і $\Delta Fсигн \approx 206$ кГц.

З цього слідує, що система з полярною модуляцією більш економно використовує радіочастотний ресурс.

Результати вимірювань показують, що при стереопередачі складові спектра (при розстроюванні відносно несучої частоти) спадають повільніше, ніж при моно передачі . Тому спектр випроміненого радіосигналу при стерео передачі виявляється більш широким. Але експериментальні дослідження показали, що для системи з полярною модуляцією допустиме зниження полоси частот радіоканалу до величини $\Delta Fсигн \approx 175$ кГц , а в системі із пілот-сигналом – до $\Delta Fсигн \approx 190$ кГц .

Відношення сигнал/шум. Теоретичний аналіз показує, що при переводі передавача з монофонічного режиму у стереофонічний відношення сигнал/шум

погіршується (наприклад теоретично, для системи з полярною модуляцією на **24,7** дБ). На практиці це погіршення складає близько **15** дБ і означає погіршення умов для реалізації захисного відношення (захисне відношення слід збільшити на цю величину) , що призводить до помітного зменшення зони обслуговування.

Найбільш слабку завадостійкість має над тональна частина комплексного стереосигнала, що формується на піднесучій . Це є природнім, оскільки при кутовій модуляції індекс кутової модуляції $m_{чм}$ зворотно пропорційний частоті модулюючого сигналу , а завадостійкість визначається саме величиною $m_{чм}$. Дана думка ілюструється на рис.10.10.

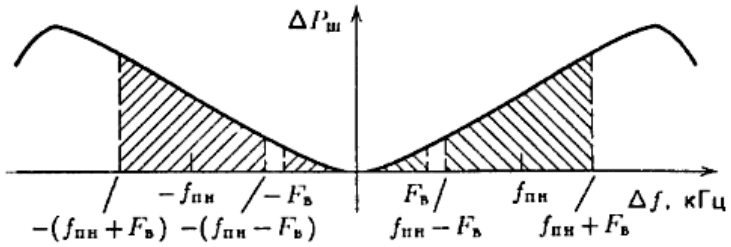


Рис.10.10. Зміна відносної потужності шуму на виході частотного демодулятора від розстрочки несущой частоти

З рисунку видно, що потужність шуму в надтональній частині комплексного стереосигналу суттєво вище , ніж у смузі частот сигнала **Л + П**. Тому завадостійкість сигнали **Л–П** виявляється нижчою завадо-стійкості сигнала **Л + П**. Виведення для системи з пілот-сигналом аналогічне.

Якість стереоприймання вважається високою при відношенні сигнал/шум після стереодекодера , більшим ніж **65** дБ (шуми непомітні на слух). Однак, у багатьох випадках навіть при наявності впевнено помітного шуму експерт все ж надає перевагу слухати мовну програму в стереоформаті. Так при відношенні сигнал/шум, рівному **40…50** дБ, стереофонічне відтворення все ще впевнено надається перевага монофонічному для більшості програм. При відношенні сигнал/шум порядку **20…25** дБ стереоприймання стає неможливим.

На якість стереоприймання суттєво впливають завади від радіомовних станцій , що працюють на сусідніх частотних каналах. Саме для них в першу чергу повинні дотримуватися норми на захисне відношення. Ще раз нагадаємо, що ***захисне відношення*** – це мінімальне відношення потужності сигналу, що приймається, до потужності завади (на вході приймача), при якому ще забезпечується радіоприймання без помітних на слух завад (викривлень) – захисне відношення по звуковому сигналу.

Для стереоприйманні необхідні більш високі захисні відношення у порівнянні з моно прийманням.

Перехідне затухання. Перехідне затухання характеризує міру ізольованості одного каналу стереопари від іншої. Кількісно затухання визначається як

$$\mathbf{a}_{п} = 20\lg(\mathbf{U}_{л.вих}/\mathbf{U}_{п.вих}) \text{ при } \mathbf{U}_{вх} = \mathbf{U}_{л} \text{ та } \mathbf{U}_{п.вх} = 0,$$

де $\mathbf{U}_{л\ вих.}$ – напруга на виході лівого каналу стереопари,

$\mathbf{U_{п\ вих.}}$ – напруга на виході правого каналу стереопари при дотримуванні приведеної вище умови.

При $\mathbf{a_п} = \infty$ спостерігається ідеальний розділ каналів стереопари.

При $\mathbf{a_п} = 0$ дБ сигнали **Л** і **П** на виході ідентичні, передача стає монофонічною , вся панорама оркестру стає стисненою в одну точку. Слухач , який розміщений на осі симетрії стереофонічної звуковідтворювальної системи , сприймає один УДЗ , що знаходиться посередині між гучномовцями , замість широкого фронту панорами.

Звуження просторової звукової панорами починає відчуватися при $\mathbf{a_п} \approx 20$ дБ. У відповідності з вимогами до системи стереофонічного мовлення (табл.7.3.) перехідне затухання між каналами стереопари не повинно бути менше 30 дБ.

Як показує аналіз, перехідне затухання $a_п$ *залежить від багатьох причин*:

- від полоси частот радіоканалу ΔFсигн ,
- форми АЧХ (ФЧХ) тракту комплексного стереосигналу,
- точності перетворення полярно модульованого сигналу у комплексний стереосигнал (в модуляторі передавача) і комплексного стереосигналу в полярно модульований сигнал (при радіоприйманні),
- а в системі з пілот-сигналом ще від точності відновлення фази (!) подавленої під несущої частоти.

Так, залежність $\mathbf{a_п}$ від ширини смуги частот радіоканалу ΔFсигн відображає приближене відношення

$$A_п \approx 20 \lg \left(\frac{\Delta F сигн}{F пн} \right),$$

де $F_{пн}$- частота піднесучої.

З цього відношення слідує, що для системи з полярною модуляцією з $F_{пн} = 31{,}25$ кГц для реалізації $a_п = 30$ дБ необхідна ширина смуги пропускання високочастотного тракту повинна бути не вужче 176 кГц.

Нагадаємо, що *тональні і надтональні складові в спектрах полярно модульованого і комплексного стереосигналу знаходяться між собою в певних амплітудних і фазових відношеннях*. Вони повинні бути збережені при проходженні через тракти передавача і приймача.

Порушення цих відношень приводить до погіршення роздільності каналів стереопари і появи нелінійних викривлень. З врахуванням фазових зсувів сумарної $\mathbf{Ф_м}$ і різницевої $\mathbf{Ф_s}$ складових (**Л –П** і **Л + П** відповідно) вираз для перехідного затухання має вигляд :

$$\mathbf{a_п} = 20 \lg \left[2\sqrt{(К_s - К_м)^2 + (Ф_s - Ф_м)^2} \right],$$

де $(К_s - К_м)$ – розбаланс нормованих коефіцієнтів передачі різницевого **S** і сумарного **M** трактів.

Коефіцієнт $К_s$ визначається як півсума, а $К_М$ – як піврізниця значень відповідних характеристик для верхньої і нижньої бокових полос надтональної частини комплексного стерео сигналу.

Перехідне затухання за рахунок нелінійних процесів (по 2-й гармоніці звукового сигналу) і коефіцієнт гармонік відповідно рівні

$$\mathbf{a_{п.нел}} = 20\lg(16/\mathbf{mK_{нс}^2}); \mathbf{K_г} \approx \mathbf{mK_{нс}^2}$$

де $\mathbf{K_{нс}}$ – піврізниця нормованих коефіцієнтів передачі для верхньої і нижньої бокових смуг надтональної частини спектра комплексного стереосигналу;

$\mathbf{K_г}$ – коефіцієнт 2-ї гармоніки (викривлення);

$\mathbf{m}$ і $\mathbf{m_s}$ – коефіцієнти модуляції відповідно синфазної і протифазної модуляції.

Якщо допустити, що рівень перехідної завади (із одного каналу стереопари в інший) не залежить від частоти, то перехідну заваду можна було б частково ліквідувати регулюванням у тракті. Після подібного регулювання некомпенсована частина перехідної завади, що залишилася, виявиться залежною від частоти і зростає з ростом останнього, рис.10.11.

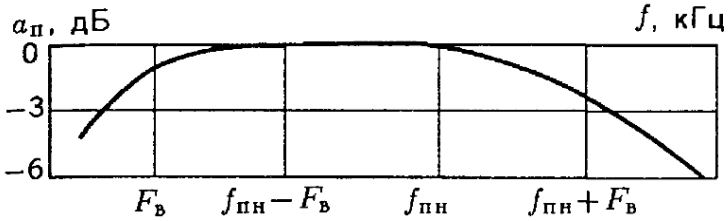


Рис.10.11. АЧХ тракту комплексного стереосигналу

В області верхніх частот спад АЧХ обумовлений недостатньою шириною полоси частот радіоканалу. Для цієї області справедливе відношення

$$\mathbf{a_{п.вч}} \approx 20\lg\left(\mathbf{2F_{ср}/F_{пн}}\right)^2,$$

де $\mathbf{F_{ср}}$ – частота на рівні –3 дБ.

Для реалізації мінімального значення $\mathbf{a_{п\,вч}} = 30$ дБ необхідно $\mathbf{F_{ср}} = 88$ кГц, що суттєво перевищує полосу частот комплексного стереосигналу.

Спад АЧХ тракту комплексного стерео сигналу в області нижніх частот обумовлюється недостатніми значеннями розділювальних ємностей в міжкаскадних колах.

Взаємозв'язок перехідного затухання $a_п$ і фазового розбалансу під-несущих $\Delta\varphi$ на передавальній і приймальній стороні відображає відношення

$$\mathbf{a_п} = 20\lg|\mathrm{ctg}(0{,}5\Delta\varphi)|.$$

В системі з полярною модуляцією відхилення фази відновленої в декодері піднесучої від фази піднесучої вихідного полярно модульованого сигналу на 11 градусів відповідає величині $\mathbf{a_п} = 40$ дБ, а при $\Delta\boldsymbol{\varphi} = 20^c$ величина $\mathbf{a_п} = 30$ дБ. При розбалансі фаз $\Delta\boldsymbol{\varphi} = 90^c$ перехідне затухання $\mathbf{a_п} = 0$: передача стає монофонічною. При розбалансі фаз $\Delta\boldsymbol{\varphi} > 90^c$ лівий і правий канали стереопари міняються місцями.

Ще більш жорсткі вимоги надаються до точності фази пілот-сигналу. Так зсув по фазі пілот-сигналу на 10^c призводить до зміни фази відновленої під

несущої вже на 20^c і як наслідок , до зменшення $\mathbf{a_п}$ до 30 дБ. При зсуві фази пілот-сигналу на 45^c величина $\Delta\boldsymbol{\varphi} = 90^c$, що відповідає $\mathbf{a_п} = 0$ (як і в системі з полярно модульованим сигналом).

Нелінійні викривлення при стереоприйманні. В сучасному стереофонічному радіомовному приймачі необхідна вибірковість по сусідньому каналу реалізується в тракті основної проміжної частоти. Цей тракт містить підсилювач-обмежувач, за допомогою якого здійснюється основне підсилення приймача і ліквідування паразитної амплітудної модуляції. До тракту приписується вимога можливо плоскої АЧХ (якій відповідає лінійна фазо-частотна характеристика). Лінійній ФЧХ відповідає постійність групового часу сповільнення $t_з$. У противному випадку виникають нелінійні викривлення (причина яких розглядається в курсі радіоприймальних пристроїв сигналів з кутовою модуляцією). Саму цей параметр є найбільш універсальним, за допомогою якого визначається рівень нелінійних викривлень (зазвичай він оцінюється коефіцієнтом гармонік).

Так, високоякісний тракт проміжної частоти може забезпечувати $\mathbf{K_г} \leq 0{,}2\,\%$; такому рівню нелінійних викривлень відповідає груповий час сповільнення $t_з = 0{,}1\ мкс$, а смуга пропускання тракту ПЧ не повинна бути менше 180 кГц (зазвичай 200…250 кГц). “Платою” за зменшення нелінійних викривлень виступає вимушене розширення смуги пропускання тракту ПЧ і , як наслідок, зниження вибірковості по сусідньому каналу. Тому в високоякісних моделях стереофонічних приймачів передбачається регулювання смуги пропускання.

Ще однією причиною появи нелінійних викривлень може бути ланцюг передвикривлень , що штучно підіймає рівень високих частот (рис.10.7). При постійній часу цього ланцюга, що дорівнює 50 мкс в системі з полярною модуляцією, рівень модулюючого сигналу на частоті 10 кГц зростає на 10,5 дБ , а на частоті 15 кГц – на 13,6 дБ. У системі з пілот-сигналом (постійна часу рівна 75 мкс) згадані величини відповідно рівні 13,3 і 17,7 дБ.

Зазвичай подібний підйом АЧХ не призводить до неприємних наслідків. Але у рідких випадках на верхніх частотах можуть з’явитися рівні сигналу, близькі до максимальних , а не середньостатистичні.

Внаслідок передвикривлень в такі моменти часу різко зростає девіація частоти передавача, що викликає значні нелінійні викривлення, що проявляються на слух як хрип.

На якість стереофонічного мовлення може суттєво впливати ефект багатошляхового (багатопроменевого) розповсюдження метрових хвиль (наприклад у мегаполісах) . Демодульований сигнал в окремі моменти часу може бути пропорційний не лише девіації частоти , але і “доповнюватися” демодуляцією змінної амплітуди сигналу, що приймається (якщо його рівень виявиться нижче порогу обмеження в обмежувачі тракту ПЧ).

Додаток. До недоліків мовлення у метровому діапазоні слід віднести:

- малі розміри зони впевненого приймання, обмежені умовою прямої видимості,

- багатопроменеву інтерференцію при прийманні у рухомому транспорті (коли неможна скористатися перевагами спрямованих антен, тоді як використання саме таких антен зазвичай планується при розрахунках зон приймання з гарантованою якістю) ,
- передавачі аналогових сигналів мовлення працюють по принципу “одна частота – один передавач – одна програма”, що не сприяє раціональному використанню національного частотного ресурсу,
- малу пропускну здатність каналів для передачі додаткової сервісної інформації у мовному каналі.

Однак є можливість не погіршуючи умов для прослуховування) додати до існуючих програм нечутні сигнали для розпізнавання програм і автоматичної настройки на них (з переліком альтернативних частот) , що висвічуються бігучим рядком (новини і інше). Крім того, можлива реалізація ряду інших сервісних функцій і передача різноманітної довідкової інформації у формі радіо тексту.

Для цих цілей Європейський союз радіомовлення (European Broadcasting Union, EBU) рекомендує використовувати систему RDS (Рекомендація МСЄ – Р 643-2).

6. Інтеграція звукового мовлення і мовних даних. Система RDS

Поява системи RDS зобов’язана технічним рішенням надання послуг радіопейджингу з допомогою розгорнутої по всій країні (Швеція) мережі мовних радіостанцій діапазону метрових хвиль 87,5…108 МГц. При цьому послуги персонального виклику реалізувались незалежно від послуг мовлення. Система була схвалена Технічним документом Tech.3244 (1984), Рекомендацією R.33-1985 EBU і Європейським стандартом CENELEC (EN50067). Ідея системи отримала розвиток у США (система RBDS) , потім у Японії (система DARC) . Нові версії системи знову були підтримані у Європі з зберіганням попередньої назви RDS. Сьогодні діє вже п’ята версія Універсального протоколу RDS. Щоб уникнути заплутаності в даній публікації замість RDS буде використовуватися абревіатура DARC.

У радіостанціях мовлення шведської моделі стереомовлення модулюючий сигнал займав полосу частот до 53 кГц. Для цілей радіопейджингу використовувалась додаткова смуга модулюючих частот вище 53 кГц. Варіант використання спектру модулюючих частот в останній версії представлений на рис.10.12.

На частотах вище 53 кГц передаються сигнали додаткової радіомовної служби (для автоматичної перестройки радіоприймачів і дистанційного керування обладнанням), а також для розповсюдження додаткової інформації у режимі передачі даних (як пов’язаної з основною функцією радіомовлення , так і не пов’язаною).

Дані в системі RDS передаються на піднесучій частоті **57** кГц (третя гармоніка пілот-тону **19** кГц) сигналами *фазової маніпуляції* зі швидкістю **1187,5** біт/с.

Формат кодових послідовностей, що модулюють піднесучу 57 кГц, представлений на рис.10.13.

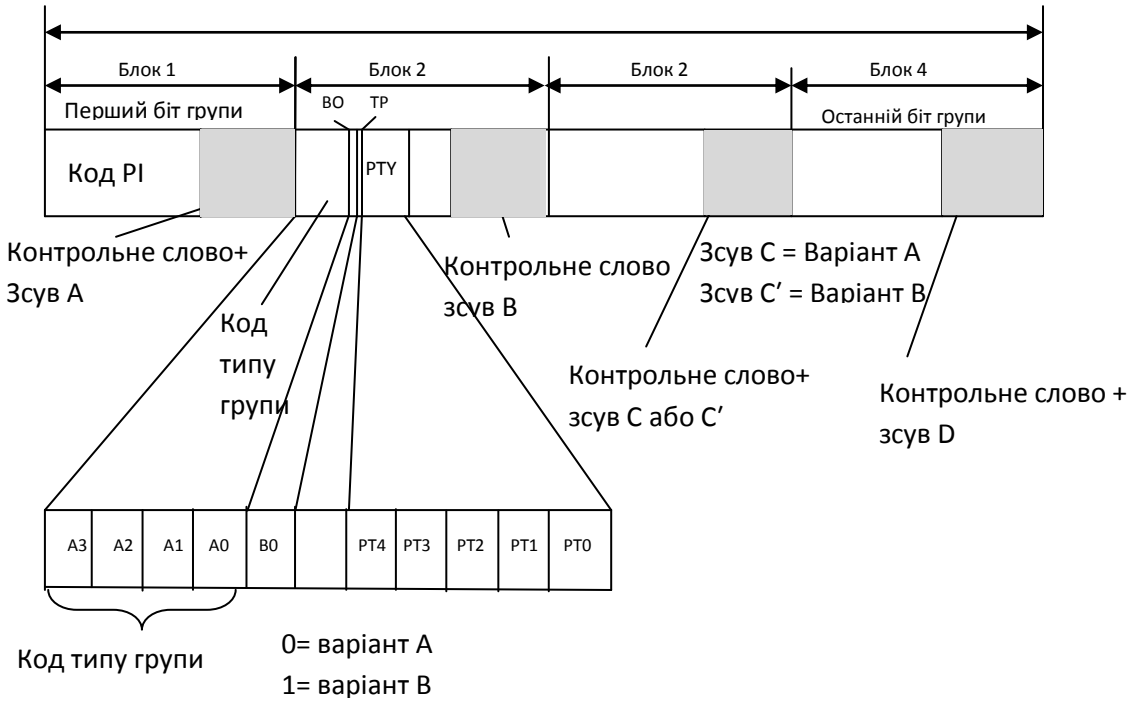


Рис.10.12. Розподіл спектру радіомовного сигналу разом з передачею додаткових функцій

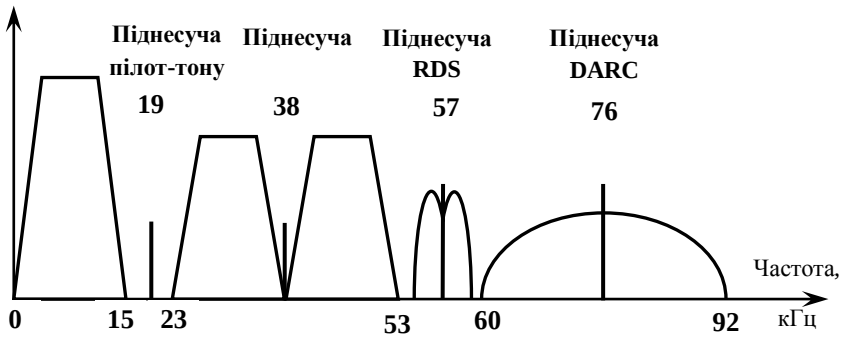


Рис.10.13. Формат однієї з 16 груп коду даних системи RDS

Повний формат включає 16 груп (з 0 до 15) по 104 біти у кожній. Група складається з чотирьох блоків по 26 біт. Блок містить інформаційне слово (16 біт) і перевірочне слово (10 біт). Для кожної з груп є дві ”версії”. Кожна група у версії підтримує задане використання (тобто для “своїх” цілей). Завдяки цьому підвищується функціональність стандарту.

В системі RDS (на певних відрізках часу) утворюється множина каналів, по яким може передаватися інформація різного призначення. Конкретні призначення регламентуються групами використання. Частина інформації, що

передається (на піднесучій 57 кГц) використовується для керування RDS-приймачів, інша частина – для надання слухачу додаткових інформаційних послуг (окрім мовної програми) , третя – для надання послуг, які взагалі не мають відношення до мовної програми.

Система RDS може бути привабливою для радіослухачів тим, що на ринку є широка номенклатура недорогих RDS – приймачів самого різного призначення (побутові, автомобільні, портативні, комп'ютерні плати з приймачем RDS).

В свою чергу, радіомовні компанії може привабити :

- невисока вартість апаратних засобів RDS (кодерів, модуляторів/моніторів даних, автоматизованого обладнання),
- потенційний прибуток за рахунок підвищення рейтингу радіостанції,
- зростання взаємодії слухачів із радіостанцією,
- можливість використання частини піднесучої для інформаційного обслуговування третьої сторони (наприклад, передача радіотексту),
- пейджинг,
- послуги навігації транспорту,
- попередження про надзвичайні події,
- електронна дошка об'яв,
- радіовизначення на місцевості з використанням системи GPS і інші.

У порівнянні з системою RDS оновлений стандарт DARC має додаткові можливості, а саме :

- перетворення комп'ютерних файлів,
- електронна пошта з багатоточковою розсилкою "факсів" і "гарячих" новин інформаційних служб (агенств),
- база даних і розширення на основі CD-ROM,
- персональна цифрова допомога і інше.

Система DARC підтримується стаціонарними, носимими, радіоприймачами які возяться, приймачами на комп'ютерних платах і приставках.

В системі використано більш потужне надлишкове кодування і криптокодування для забезпечення умовного доступу. Передача даних ведеться з інформаційною швидкістю 9,6 кбіт/с. Максимальна швидкість маніпуляції (методом MMC, MSK) піднесучої 76 кГц складає 16 кбіт/с.

Мовлення даних передбачає

- підготовку даних (планування, збір даних, підготовку власних даних, їх обробку , проведення організаційних заходів).
- контроль і формування потоків даних з врахуванням відповідних груп використання,
- випуск і облік даних.

В найпростішому випадку (система RDS) ці процеси забезпечуються службою передачі даних (рис.10.14), яка може входити до складу мовної радіостанції чи притягуватися зі сторони.

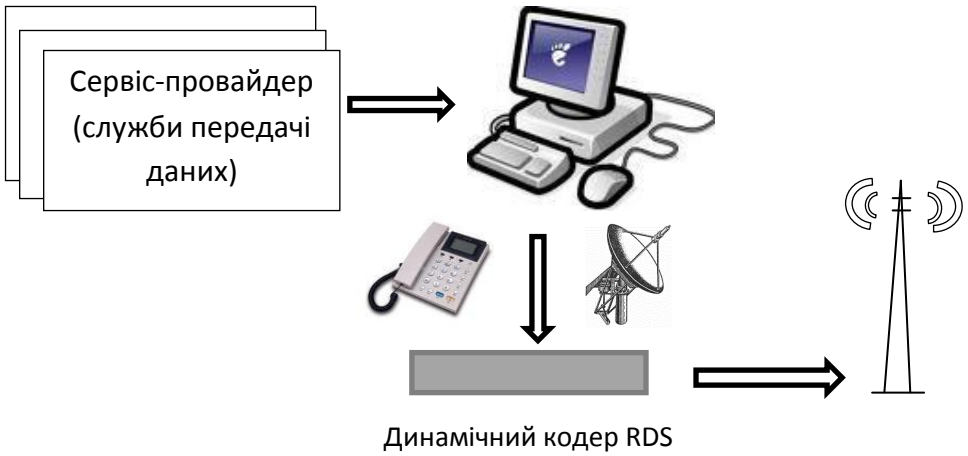


Рис.10.14. Архітектура мережі RDS з використанням динамічного кодеру

У більш складному варіанті (DARC) групи користувачів додатковими послугами досить різноманітні. Якщо число постачальників додаткової інформації велике і є значний потік власної додаткової теперішньої інформації , тому хто передає доцільно мати власні засоби передачі даних окрім притягнутих сторонніх служб, рис.10.15.

Відмічаючи позитивні наслідки впровадження сумісної системи радіомовлення і додаткової передачі даних в режимі мовлення , слід звернути увагу на економічну доцільність даної служби і правові аспекти даної гібридної служби.

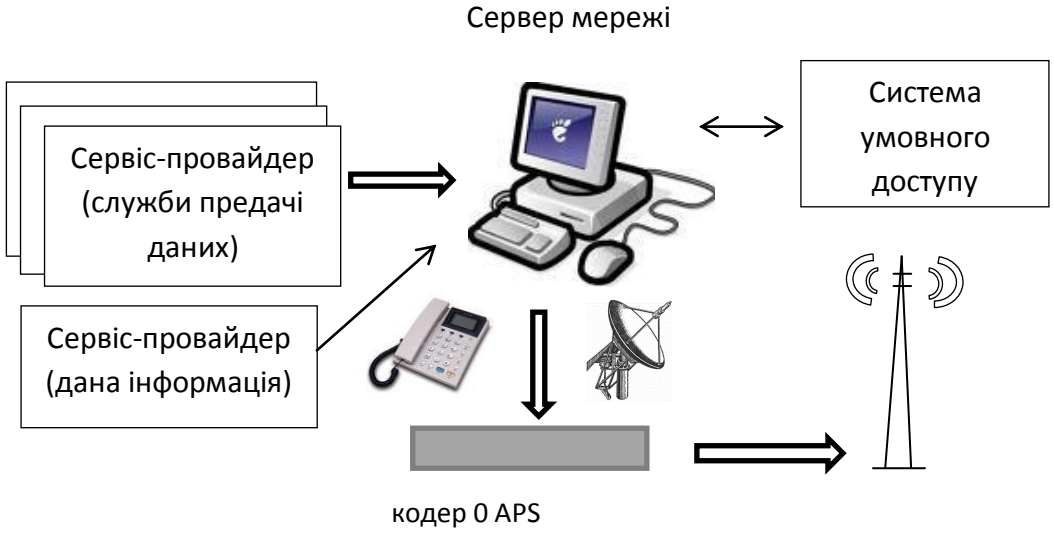


Рис.10.15. Архітектура мережі DARC (ETSI ETS 300751)

До правових питань відносяться, наприклад наступні :

- мовлення додаткової інформації може здійснюватися на основі ліцензії на передачу такої інформації , отриманої у встановленому порядку,

- переважне право на отримання ліцензії (дозволяючи передавати дані) має радіомовна компанія, що має ліцензію на радіомовлення звукових програм на ліцензованій частоті,
- радіомовна компанія несе відповідальність за зміст передач, що передаються, у тому числі і за зміст додаткової інформації; розділити цю відповідальність (але не уникнути її повністю) радіомовна компанія може з постачальником додаткової інформації, якщо це передбачено у договорі між постачальником інформації і радіомовною компанією,
- радіомовна компанія несе відповідальність за технічну якість програми, що нею випускається; вона не повинна порушувати норми технічних стандартів, передбачених умовами сертифікації,
- радіомовна компанія повинна здійснити запис всієї додаткової інформації, що надходить до ефіру, і зберігати її на протязі встановленого терміну (по аналогії із записом і зберіганням звукових програм і передач).

Переходу до перспективної цифрової технології мовлення, що базується на використанні обчислювальних мереж для передачі, обміну і зберігання відеоданих, аудіоданих і інших даних (текстових , графічних і т.д.) довгий час заважали :

- множина діючих форматів цифрового запису, що використовуються для мовних цілей, які не спрягалися один з одним,
- різні стандарти стиснення цифрових потоків сигналів зображення і звуку в теле- і радіомовних комплексах; перехід від одного формату запису чи стандарту стиснення до іншого може призвести до критичної втрати якості сигналів,
- різноманіття різних класифікаторів, що практично використовуються у світі для ідентифікації програмного матеріалу (телевізійних і звукових передач і програм); це утрудняло не лише пошук необхідного матеріалу , але і гальмувало розвиток техніки (апаратної і програмної частин), оскільки надто ризиковано проводити дорогі розробки без твердої впевненості у вихідних даних.

По цим причинам колективами спеціалістів різних країн були зроблені зусилля по гармонізації вимог, що надаються аудіо- і відеоматеріалам, даним, засобам їх перетворення, транспортування і зберігання, з метою полегшення можливості вільного доступу до них. Вже досягнутий значний прогрес у даній області. Ключевим моментом в рішенні задачі виявився вибір структури комбінованого файлу, так званого метафайлу.

Вміст метафайлу (content) складається з двох частин різного призначення. В термінах інформатики перша частина – це власне чиста інформація (сутність, essence), а друга частина метадані (metadata), що містить відомості про сутність інформації (дані про дані). Число різних варіацій метаданих потенційно безмежно. Однак, для описання вимог до метаданих вони були розмежовані на декілька категорій.

Для більш детального вивчення читач може звернутися до документів EBU (наприклад, Tech. 3295).

Питання для самоконтролю

1. Поясніть принцип функціонування системи стереомовлення з полярною модуляцією.
2. Поясніть принцип функціонування системи стерео мовлення з пілот-сигналом.
3. Поясніть принцип функціонування системи стереомовлення ЧМ-ЧМ.
4. Дайте коментарі до вибору смуги частоти сигналу радіомовлення при стереофонічній передачі з полярною модуляцією.
5. Аргументуйте можливі причини зниження перехідного затухання між каналами стереопари і заходи, що застосовуються для його збільшення.

ДОДАТОК І. РИСУНКИ ДО ЛЕКЦІЇ №10

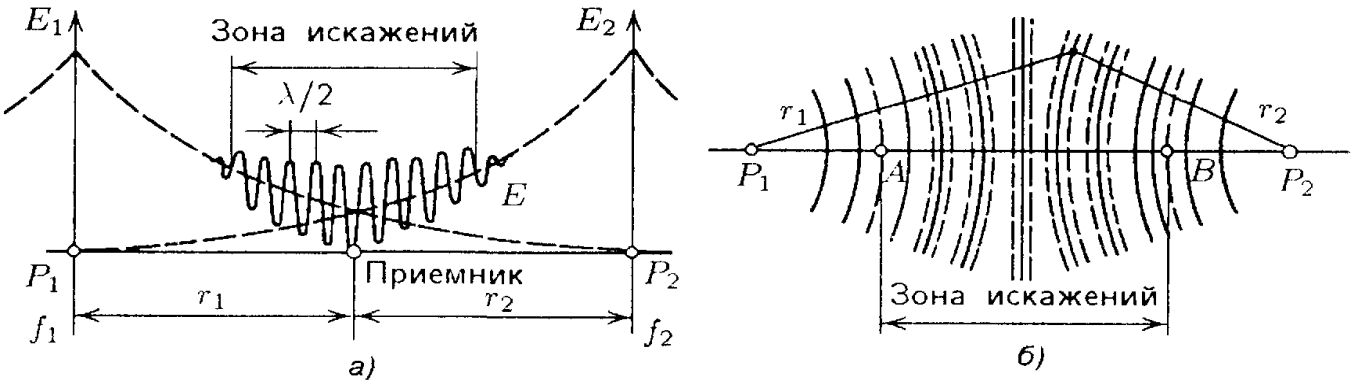


Рис.10.2. Искажения при работе двух передатчиков в сети синхронного радиовещания: а — интерференционная структура электромагнитного поля в зоне искажений; *б* — участки хорошего и плохого радиоприема

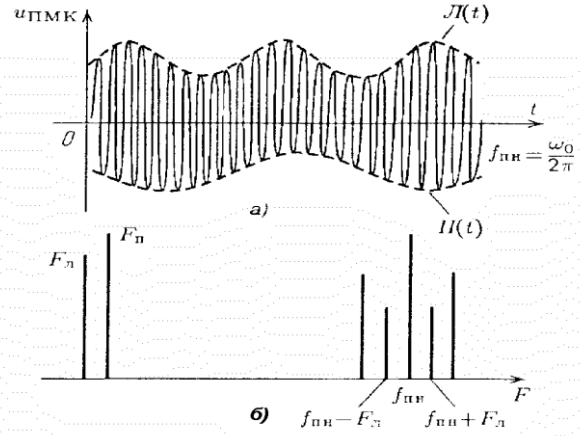


Рис.11.1. Принцип формирования ПМК

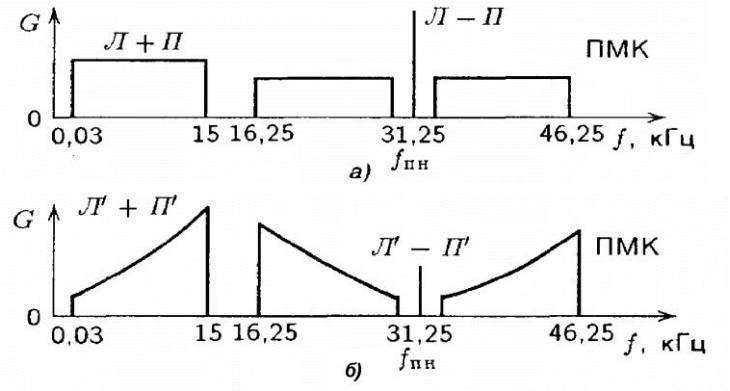


Рис.11.2. Спектр ПМК (а) и КСС (б)

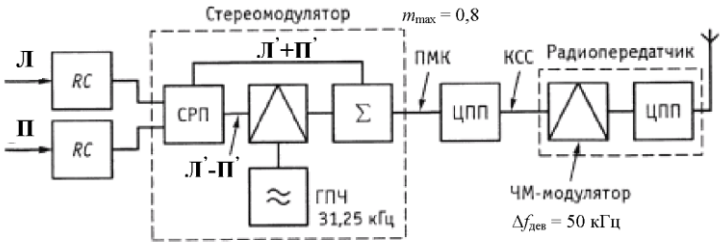


Рис.11.3 Структурная схема передающего тракта системы стереофонического радиовещания

Рис.11.4. Структурная схема стереодекодера с полярным детектором

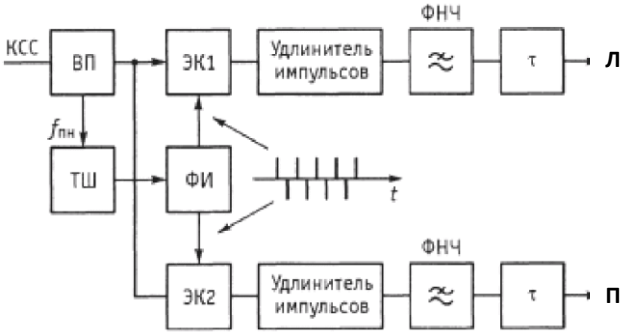


Рис.11.6. Структурная схема стереодекодера с временным разделением каналов

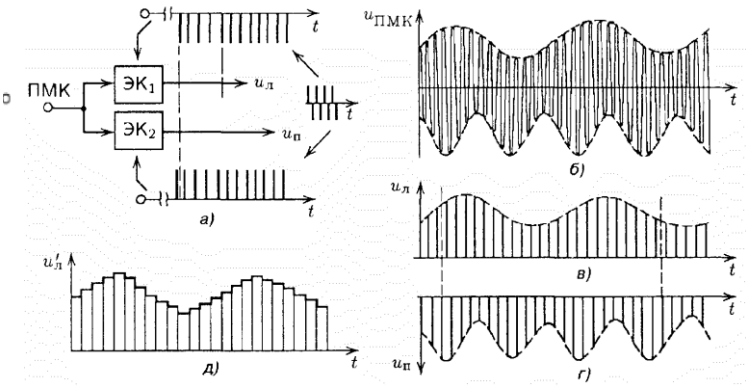


Рис.11.7. Диаграммы, поясняющие принцип ключевого декодирования

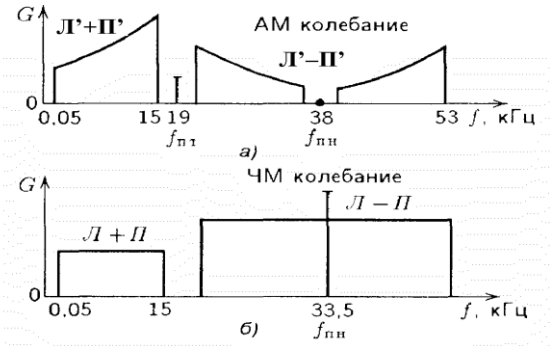


Рис.11.8. Спектр КСС в системах с пилот-тоном (а) и ЧМ-ЧМ

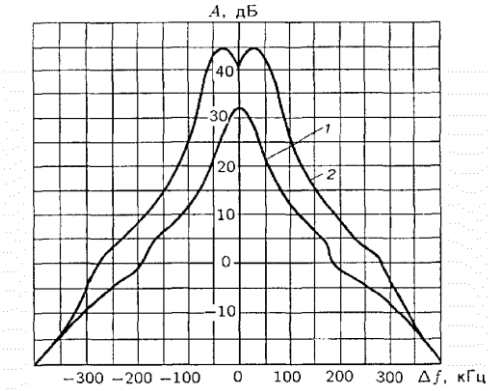


Рис.11.11. Зависимость защитного отношения по радиочастоте от разности между несущими частотами полезного и мешающего сигналов для моно- (кривая *1)* и стереоприема (кривая 2) МВ-ЧМ станций

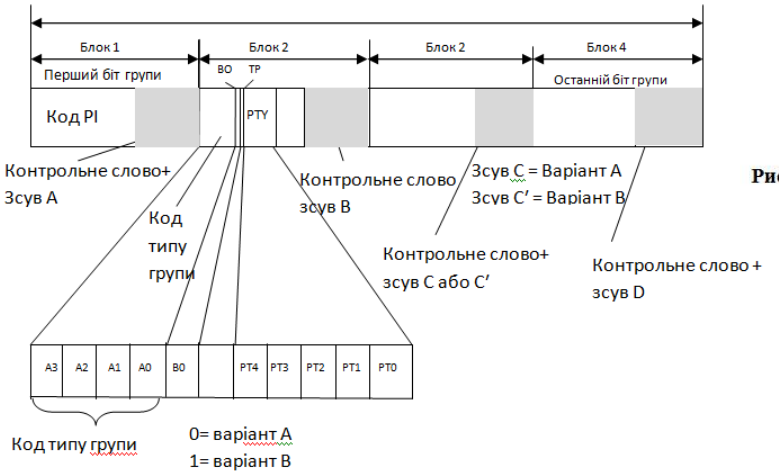


Рис.10.12. Розподіл спектру радіомовного сигналу разом з передачею додаткових функцій

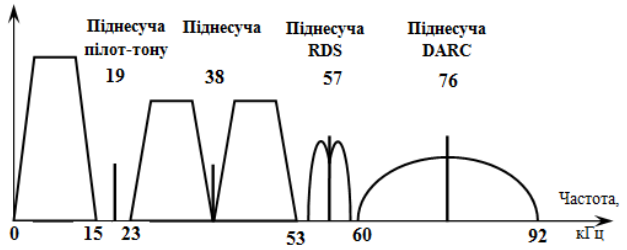


Рис.10.13. Формат однієї з 16 груп коду даних системи RDS

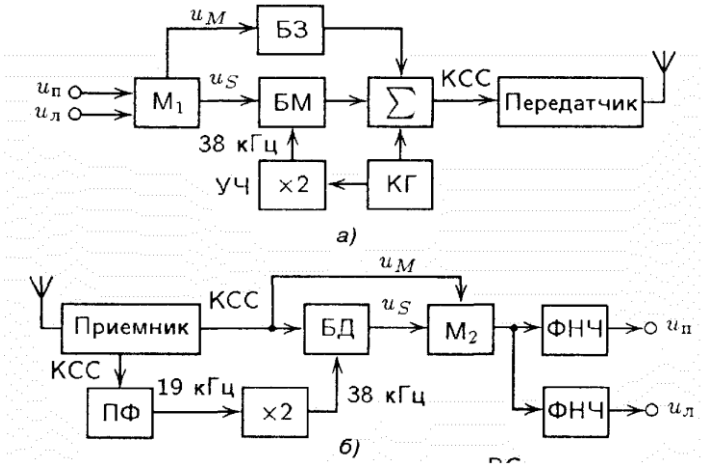


Рис.11.9. Структурные схемы формирования (а) и декодирования (б) комплексного стереофонического сигнала в системе с пилот-тоном: с применением суммарно-разностного преобразования

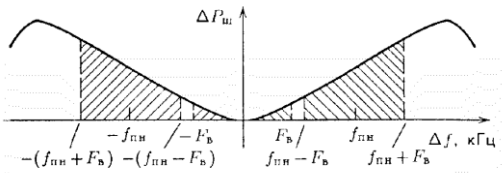


Рис.11.10. Изменение относительной мощности шума на виході частотного демодулятора от расстройки несущей частоты

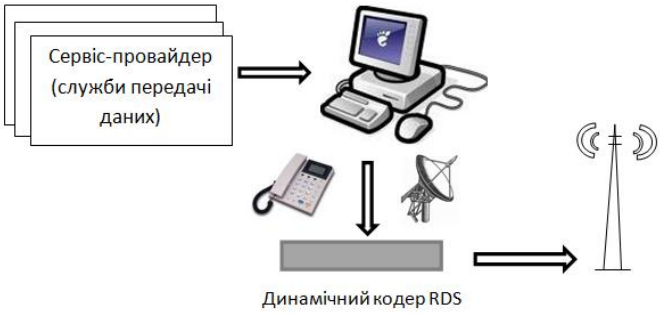


Рис.10.14. Архітектура мережі RDS з використанням динамічного кодеру

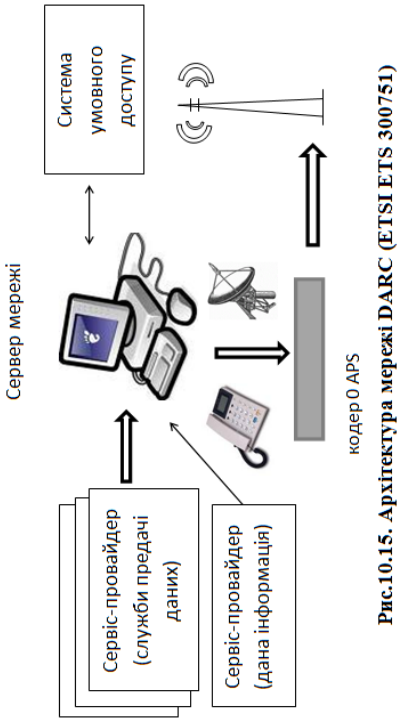


Рис.10.15. Архітектура мережі DARC (ETSI ETS 300751)

ЛЕКЦІЯ №11 ЦИФРОВЕ ПОДАННЯ ЗВУКОВИХ МОВНИХ СИГНАЛІВ

ЛІТЕРАТУРА:

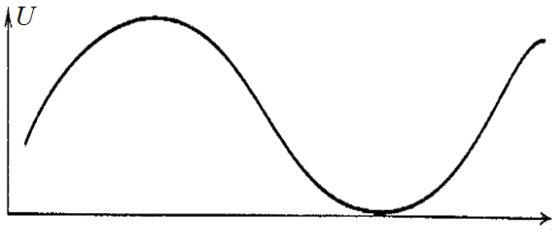
1. Брагин А.С. Технологии вещательных служб. Часть 1. Технологии звукового радиовещания. –К.: НТУУ «КПИ», 2006.
2. Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов./Под ред. Ю. А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком., Радио и связь, 2007. – 872 с.

РОЗДАТНИЙ МАТЕРІАЛ: див. ДОДАТОК Й

1. Аналогово-цифрове перетворювання звукових сигналів

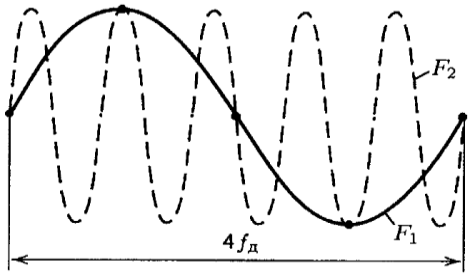
Процедура АЦП (на передавальній стороні) складається з трьох операцій:
- ***дискретизації за часом*** (визначення моментів відліку рівня сигналу, рис. 11.1,б);
- ***дискретизації за рівнем*** (квантування, округлення) отриманої сукупності відліків; після дискретизації сигнал називається дискретним, рис.11.1,б;
-заміни (***кодування***) квантованих значень сигналу послідовністю чисел, кожне з яких може запам'ятовуватися і далі готуватися для обробки і передачі, рис.11.1,г.

а) аналоговий звуковий сигнал

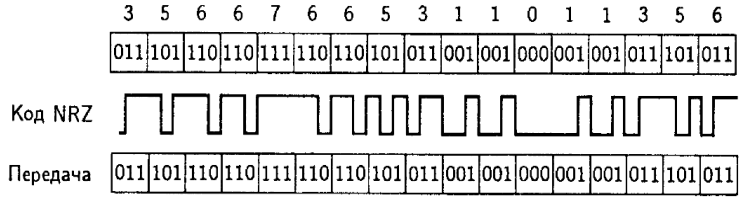


б) дискретна послідовність

в) ілюстрація до правильного вибору частоти дискретизації



г) кодування відліків в двійковій системі числення та передача кодових слів східчато змінюваних за часом напруги



д) спектр дискретизованного сигналу

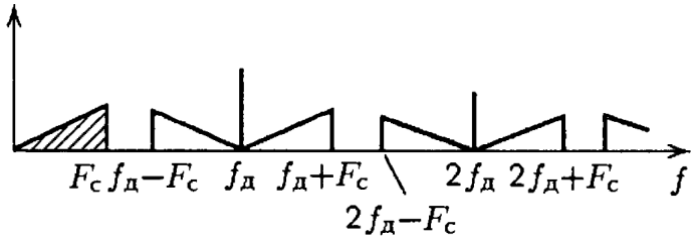


Рис 11.1. Ілюстрації до цифрового поданням звукових сигналів

Вихідний сигнал являє собою часову послідовність відліків, віддалених один від одного на інтервал часу $\Delta t_д$ (інтервал дискретизації, період дискретизації). Величина, зворотня періоду дискретизації, називається частотою дискретизації $f_д = 1/\Delta t_д$.

Спектр дискретизованого сигналу представлений на рис.11.1,д. Дискретна послідовність відліків є імпульсною послідовністю, що промодульована за рівнем вхідного аналогового коливання. Тривалість імпульсу, який несе інформацію про рівень аналогового сигналу в момент відліку, не повинна перевищувати $0{,}1\Delta t_д$.

Розглянуті вище три процеси (дискретизація, квантування і кодування) свого часу отримали найменування «імпульсно-кодова модуляція» (ІКМ, Pulse Code Modulation - PCM).

Термін не можна визнати вдалим, оскільки в загальноприйнятому розумінні під модуляцією розуміється процес зміни одного або кількох параметрів несучого коливання за законом зміни рівня «первинного електричного сигналу», що передається. Тому в сучасних джерелах, присвячених цифровому зв'язку, дискретизація, квантування чи кодування віднесені до процедури форматування сигналів.

На рис.11.1,в представлено дві синусоїди: з низькою частотою F_1 і вп'ятеро більшою F_2. Процедура дискретизації з однією і тією ж частотою $f_д$, (моменти зняття відліків позначені жирними крапками) дає абсолютно однакові значення відліків. Отже, сигнали цих двох частот F_1 і F_2 в дискретній формі не можна відрізнити один від одного, а після зворотнього перетворення правильно відновити (реконструювати).

Правильний вибір частоти дискретизації $f_д$ сформульований в теоремі В.А. *Котельникова*.

2. Дискретизація. Квантування. Кодування

2.1 Дискретизація

Відповідно до теореми відліків *В.А. Котельникова* неспотворена передача неперервного (аналогового) сигналу зі смугою частот $\Delta F_{сигн}$ дискретною послідовністю його відліків можлива тільки в тому випадку, якщо частота $f_д$ пов'язана зі смугою частот $\Delta F_{сигн}$ співвідношенням $f_д \geq 2\Delta F_{сигн}$.

Заслуговує уваги вибір величини $f_д$, оскільки співвідношення між $f_д$ та $\Delta F_{сигн}$ не є суворою рівністю. Зазвичай величина $f_д$ вибирається з деяким запасом. Наприклад, для телефонних сигналів, що передаються по каналах ТЧ, величина $f_д$ вибирається рівною 8 кГц (на 18% вище подвоєної смуги сигналу, що дискретизується), а для телевізійних сигналів з $\Delta F_{сигн} = 6$ МГц величина $f_д$ вибирається рівною 13,5 МГц (на 13% вище подвоєної смуги вихідного сигналу). Нагадаємо, що аналоговий звуковий сигнал займає смугу $\Delta F_{сигн} = F_{макс} < 20$ кГц. Отже, необхідна частота дискретизації повинна бути не менше 40 кГц: лише в цьому випадку можливе відновлення неперервного

сигналу з дискретного. Частоту $0{,}5\mathbf{f}_д$ іноді називають частотою Найквіста. Усі сигнали, частота яких $\mathbf{F}>0{,}5\mathbf{f}_д$, при відновленні інтерпретуються неправильно і трансформуються в сигнали більш низької частоти, рис. 11.1, в.

З рис. 11.1,д випливає, що чим більше $\mathbf{f}_д$ в порівнянні з $\mathbf{F}_{макс}$, тим легше в демодуляторі відфільтрувати спектр корисного сигналу (0… $\mathbf{F}_{макс}$) від інших складових спектру.

При передачі звукових сигналів або його обробці крок дискретизації $\Delta\mathbf{t}_д$ (або $\mathbf{f}_д$) не зобов'язаний бути одним і тим же в різних трактах каналу або на різних стадіях обробки.

На вибір величини $\mathbf{f}_д$ впливають й інші міркування. Так як цифрові сигнали мовлення часто кодуються і передаються спільно з іншими (наприклад, телефонними, основний цифровий канал яких має швидкість 64 кбіт/с), то частота дискретизації мовних сигналів повинна бути кратна частоті дискретизації телефонного сигналу (8 кГц). В іншому випадку в загальній структурі цифрового потоку в системі зв'язку неможливо забезпечити передачу широкосмугових сигналів (якими є сигнали звукового мовлення) замість кількох стандартних телефонних. З урахуванням цих міркувань при АЦП сигналів мовлення в *цифрових трактах первинного та вторинного розподілу програм для звукового мовлення* з $\mathbf{F}_{макс}$ = 15 кГц прийнято значення $\mathbf{f}_д$ = 32 кГц, що відповідає значенню учетвереному $\mathbf{f}_д$ для сигналів в телефонних каналах.

У системах телебачення при передачі цифрових сигналів звукового супроводу (щоб уникнути биття між гармоніками частоти рядкової розгортки і частоти дискретизації) значення $\mathbf{f}_д$ вибирається кратним частоті розгортки.

У трактах формування програм при $\mathbf{F}_{макс}$ = 20 кГц значення $\mathbf{f}_д$ складає 48 кГц, а в лазерних програвачах і побутових магнітофонах $\mathbf{f}_д$ = 44,1 кГц, табл. 11.1.

Таблиця 11.1. Стандартні показники одноканальних цифрових сигналів

Показники	В каналах зв'язку	Апаратура	
		студійна	***побутова***
Частота дискретизації, кГц	32	48	44,1
Смуга частот, кГц	15	20	20
Розрядність кодування	14/10	16	8;10;12;14;16

Щоб уникнути похибки цифрового перетворення, що викликаються можливою нестабільністю частоти дискретизації, пред'являються строгі вимоги до стабільності частоти генераторів тактової частоти $\mathbf{f}_д$. Крім того, висуваються жорсткі вимоги до крутизни спаду АЧХ фільтрів нижніх частот на вході

аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), що обмежують величину $\mathbf{F_{макс}}$ (див.нижче, рис.11.5). Звичайно це еліптичні фільтри 7...9 порядків. Частота звуків мови та музичних інструментів не перевищують 20 кГц. Більш високі частоти, які потрібно придушувати, виникають при використанні (як джерело) аналогових магнітофонів, у яких разом зі звуком присутній сигнал високочастотного підмагнетовування з частотою 50 ... 250 кГц.

Частоти вище 20 кГц можуть зустрічатися в синтетичній музиці й звуках, що видаються тваринами і птахами. В останні роки широко обговорюється питання про необхідність придушення на вході АЦП частот нижчих за 20 Гц. За рахунок нелінійності вузлів цифрового тракту ці частоти можуть створювати паразитну амплітудну модуляцію звукових сигналів, яка значно погіршує якість звучання. Такий ефект відомий в магнітофонах і виявляється як ***детонація.*** Особливо вона помітна на слух при модуляції коливаннями з частотою близько 4 Гц.

Зі зростанням $\mathbf{f_д}$ зростає швидкість цифрового потоку відліків (швидкість зміни нулів та одиниць). Для підвищення ефективності використання частотного ресурсу каналу зв'язку при передачі звукових програм бажано (наскільки це можливо) знизити $\mathbf{f_д}$. Зниження $\mathbf{f_д}$ за рахунок зменшення допустимого значення $\mathbf{F_{макс}}$ веде до погіршення якості звучання. Тому значення $\mathbf{f_д}$ *вибирається з компромісних міркувань між якістю звуковідтворення і допустимою швидкістю цифрового потоку в каналах передачі*.

2.2 Квантування

При ***квантуванні*** (від лат. quantum - скільки) безперервній (тобто безкінечного) множині значень відліків аналогового сигналу ставиться у відповідність кінцева множина значень, які називаються рівнями квантування, тобто кожне значення відліку замінюється найближчим до нього дозволеним значенням. Відстань між сусідніми дозволеними значеннями (рівнями квантування) називається кроком квантування Δ. ***Крок квантування*** Δ – це мінімальний поділ двійкової шкали, що виражається в одиницях напруги (мВ, мкВ і т.п.). При переході до відносної амплітуди змінюється і двійкова шкала.

Процедуру квантування можна розглядати як результат проходження вхідного аналогового сигналу через пристрій з амплітудною характеристикою ступінчастої форми, яка називається миттєвою характеристикою (шкалою) квантування (рис.11.2). Якщо в межах цієї характеристики крок Δ постійний, то квантування називається рівномірним.

Зона квантування (рис.11.2,а) характеризує робочу область, в межах якої виконується квантування. При виході за межі цієї зони вихідна напруга буде залишатися незмінною і рівною $\mathbf{U_{вих.макс}}$ незалежно від рівня вхідної напруги. Неквантованний в зоні обмеження сигнал вносить помилку, шо називається шумом обмеження.

Цей простий вид квантування широко використовується в цифровий техніці. Він зручний для початкового цифрового представлення звукових

сигналів з метою їх подальшої обробки, а також наступного скорочення надлишковості цифрових сигналів при передачі їх по каналах зв'язку.

Рівномірне квантування часто служить також першим етапом для наступного нерівномірного квантування.

Різниця між вихідними і квантованими значеннями відліків (рис.11.3,б) і утворює згадану похибку, яка називається коротко ***шумами квантування***. Таким чином, квантування сигналу неминуче супроводжується похибкою.

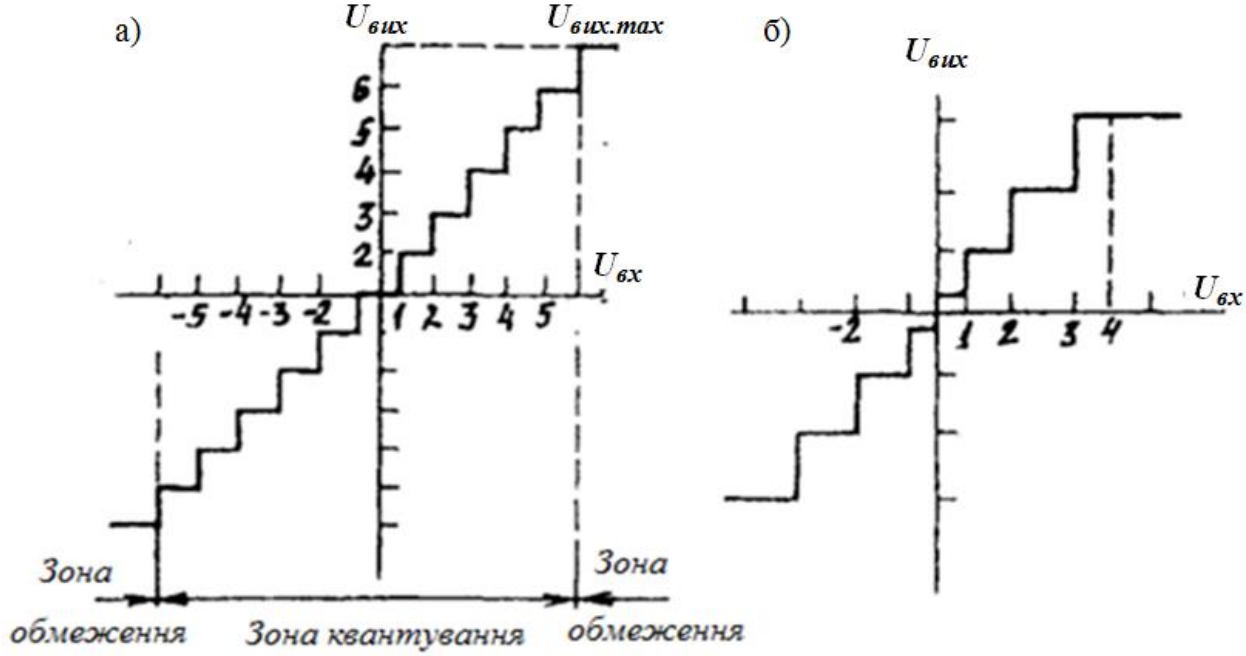


Рис.11.2 Рівномірна (а) та нерівномірна (б) характеристики квантування

а) квантування неперервного сигналу

б) похибка квантування

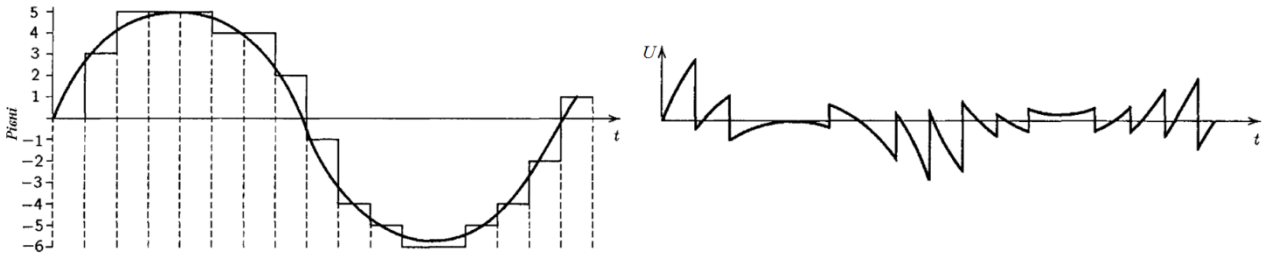


Рис.11.3 Виникнення шумів квантування

Термін «шуми квантування» короткий для вживання, але не коректний за змістом, оскільки шуми у загальноприйнятому розумінні некорельовані з сигналом (на відміну від наведеного, невипадкового «шуму»). Вірно казати про спотворення в процесі квантування.

Чим менше крок квантування Δ, тим менше рівень спотворень. Квантування – це безінерційне-нелінійне перетворення сигналу, при якому сигнал не можна передати як завгодно з малою помилкою ні при якому кінцевому кроці квантування.

2.3 Кодування

Цією процедурою називається подання кожного рівня квантування відповідною йому кінцевою кодовою групи символів, званої кодовим словом. Найчастіше кодування полягає в заміні квантованого відліку (який можна розглядати як деяке число) його поданням в двійковій системі числення. Двійкові кодові слова мають всього два кодові символи 0 і 1. Максимальне число $\mathbf{n}_{\text{макс}}$ в двійковій системі числення представляється у вигляді:

$$\boldsymbol{n}_{\text{макс}} = a_{m-1}2^{m-1} + a_{m-2}2^{m-2} + \cdots a_0 2^0 \qquad (11.1)$$

Символи $a_{m-1}, a_{m-2}, \ldots, a_0$ можуть приймати тільки два значення (біти): 0 або 1. Біти в кодовому слові мають різну вагу. Найменшу вагу має молодший біт a_0, що несе інформацію про один крок квантування. Старший біт a_{m-1}, несе інформацію про 2^{m-1} кроки квантування, і тому має найбільшу вагу.

Розрядність двійкового коду m (число символів в кодовому слові) ставиться в залежність від кількості рівнів квантування $\boldsymbol{n}_{\text{макс}}$:

$$\boldsymbol{n}_{\text{макс}} = 2^m$$

При m = 7 максимальна кількість рівнів квантування одно $\boldsymbol{n}_{\text{макс}}$ = 128, при m = 8 $\boldsymbol{n}_{\text{макс}}$ = 256 і т.д. Так, якщо кодується відлік з рівнем квантування n=115, а $\boldsymbol{n}_{\text{макс}}$ = 256, то кодове слово буде мати число розрядів m = 8. Кодований квантований відлік записується в наступному вигляді:

$$\boldsymbol{n} = 115 = 0 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$$

Відповідне йому кодове слово має вигляд 01110011. Такий код називається натуральним. У цифрових системах зв'язку та мовлення поширені симетричні коди.

Для двополярних сигналів необхідно використовувати квантувач із симетричною характеристикою квантування. У більшості випадків такі характеристики легше отримати, використовуючи однополярний квантувач, комутатор та інвертор полярності сигналу, рис.11.4.

Операція дискретизації за рівнем включає визначення миттєвого значення сигналу і визначення модуля миттєвого значення. Інформацію про знак (полярності) сигналу формує визначник знаку, який встановлює в відповідне положення комутатор і одночасно посилає в кодер 0 або 1. Квантувач завжди «працює» з однополярним сигналом.

При кодуванні в симетричному коді перший розряд кодового слова визначає полярність сигналу, а інші несуть інформацію про абсолютне значення (модуль) кодованого відліку. Якщо кодується позитивна напівхвиля коливання, то першим бітом кодового слова є 1, а якщо негативна напівхвиля, то 0. Рівні за абсолютним значенням різнополярні відліки в цьому випадку, відрізняються тільки першим символом в кодовому слові. Кожна напівхвиля сигналу кодується m - 1 символів.

У сучасній високоякісній апаратурі запису та відтворення звуку число звукових каналів лежить зазвичай в межах від 2 до 6, частота дискретизації вибирається в інтервалі 44,1 ... 192 кГц, а число розрядів *m* в кодовому слові становить від 16 до 24. Тому швидкість потоку аудіоданих може змінюватися в широких межах від 700 Кбіт/с до 27 Мбіт/с.

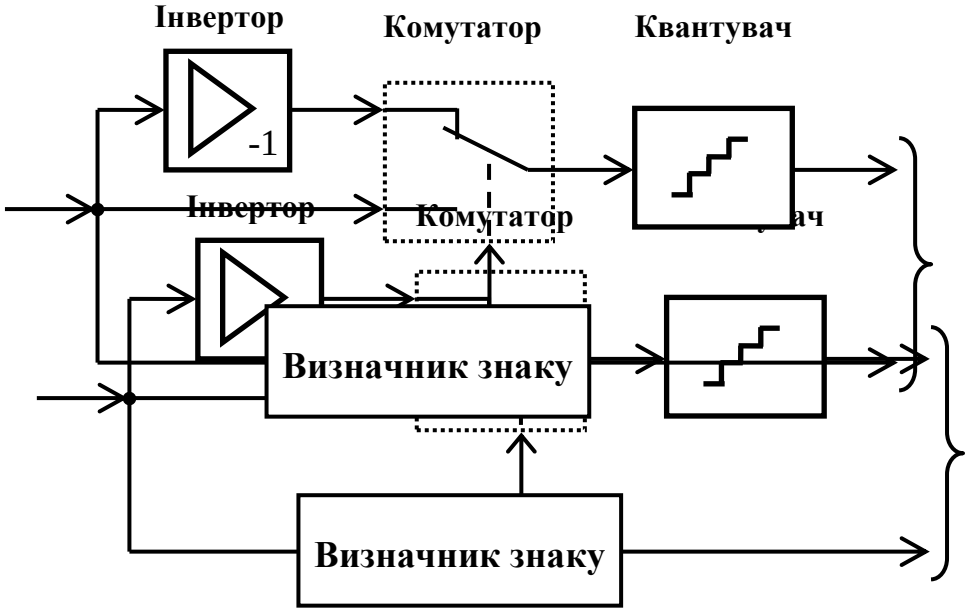


Рис. 11.4 Квантувач двухполярного сигналу

У професійній студійній апаратурі число звукових каналів досягає 24...48 і, отже, швидкість групового цифрового потоку ще більше.

Послідовність *m*-розрядних кодових слів є вихідним сигналом аналогово-цифрового перетворення. Зазвичай при передачі й записі до вихідного сигналу АЦП додаються додаткові символи для синхронізації, виявлення й виправлення помилок. Кодові слова разом з додатковими бітами обьєднуються в блоки. Порядок проходження кодових слів та додаткових символів називається форматом коду.

3. Шуми квантування

Вище зазначено, що шуми квантування виступають як спотворення аналогового сигналу, що передається. Тому в цифрових системах передачі важливим показником є величина відношення потужності сигналу $\mathbf{P_c}$ до потужності шуму квантування $\mathbf{P_{ш.кв}}$. При заданій $\mathbf{P_c}$ слід намагатися зменшити $\mathbf{P_{ш.кв}}$, щоб реалізувати прийняте відношення $\mathbf{P_c/P_{ш.кв}}$.

Знайдено, що для рівномірної шкали квантування потужність шуму квантування визначається виключно кроком квантування

$$P_{ш.кв} = \Delta^2/12 \qquad (11.2)$$

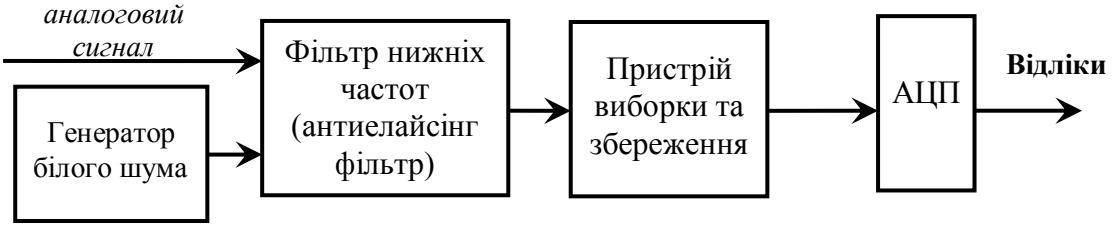
і не залежить від величини сигналу. Тому при зменшенні рівня сигналу відношення $\mathbf{P_c/P_{ш.кв}}$ знижується. Отже зменшується і якість сигналу, що приймається слухачем.

Спектр шуму квантування в смузі частот 0... $\mathbf{f_д}/2$ близький до рівномірного. Він виникає тільки при наявності сигналу. Здавалося б, що при відсутності сигналу шум на виході АЦП також відсутній. Але це не так, *наявність теплових шумів вхідних аналогових блоків АЦП, нестабільність напруги живлення, перехідні завади від сусідніх каналів, дрейф постійної складової в підсилювачах постійного струму і т.п. обумовлюють наявність шумів при відсутності звукового сигналу*. Ці шуми на вході АЦП можуть досягати першого рівня квантування. На виході АЦП це коливання шумів, може утворити квантований шум паузи. Як показує аналіз, його величина може перевищувати величину шуму квантування в 3 рази (на 4,7 дБ).

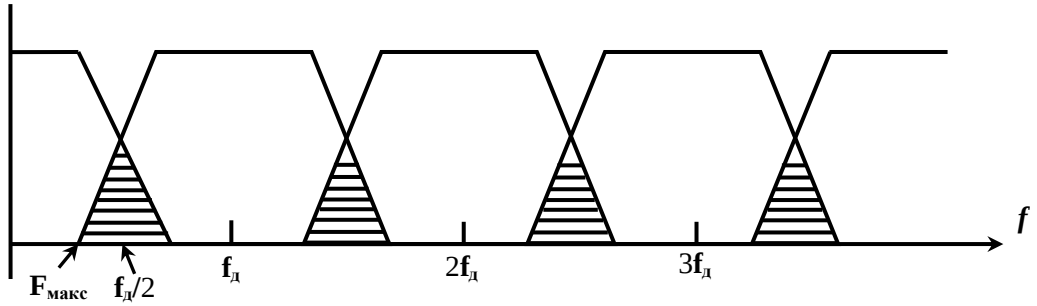
Якщо рівень сигналу, що дискретизується, невеликий, то в АЦП виникають характерні спотворення, обумовлені появою вищих гармонік через зубчастість форми шуму квантування (рис.11.3,б). Причому на слух це сприймається саме як викривлення, а не як шум.

Ослабити вплив таких спотворень можна додаванням іншого шуму (як не парадоксально це звучить). Якщо підмішати у вхідний сигнал так званий розгойдуючий «білий шум» (рівень якого практично постійний в широкій смузі частот), рис.11.5,а, то кореляція між шумами квантування і амплітудою сигналу порушується. При цьому відтворений сигнал вже не буде сприйматися як спотворений. Додавання такого шумоподібного маскуючого коливання (***діфера***) є важливою частиною процесу перетворення мовного сигналу.

а) пристрій дискретизації та квантування



б) спектр дискретизованого сигналу без ФНЧ



в) спектр дискретизованого сигналу без ФНЧ

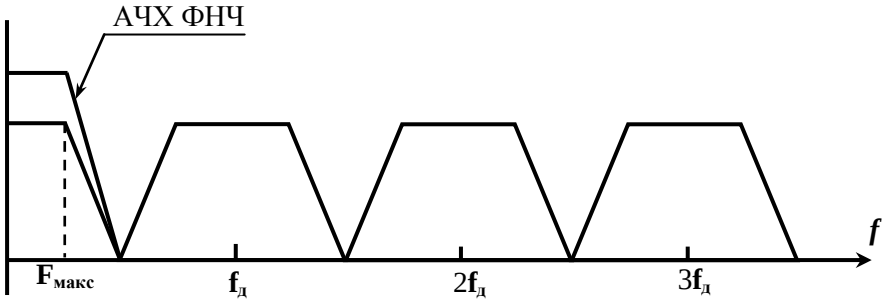


Рис.11.5 Пристрій дискретизації та квантування (а) ; спектр дискретизованного сигналу без ФНЧ (б) та з ФНЧ (в)

Відзначимо, що спотворення процесу дискретизації виникають після АЦП на передавальній стороні, а виявляються при відновленні на приймальній стороні після перетворення цифрової послідовності у вихідний аналоговий сигнал. Спочатку з цифрової послідовності відновлюється дискретний (ступінчастий) сигнал. Ступенева функція містить крім відновлюваного тонального сигналу множину модульованих складових (рис.11.1,д). При відновленні тільки аналогової складової всі високочастотні продукти повинні бути відфільтровані фільтром нижніх частот (ФНЧ), аналоговим або цифровим. Це можна зробити, якщо спектри сигналу (на рис. 11.1,д заштрихована) мають «зазор» з іншими спектральними складовими. Цій умові і задовольняє теорема В. А. Котельникова.

Щоб не відбувалося «перекриття» спектру корисного сигналу (0… $\mathbf{F_{макс}}$) зі спектром першої гармоніки $\mathbf{f_д}$, перед пристроєм дискретизації слід встановити фільтр нижніх частот з такою частотою зрізу, щоб жодна складова спектру вище $0{,}5\mathbf{f_д}$ не потрапила на перетворювач (рис.11.5,в).

В іншому випадку високочастотна частина звукового сигналу може «накластися» (рис.11.5,б) на суміжну (ліву) бічну смугу спектра першої гармоніки $\mathbf{f_д}$. У перетвореному сигналі виникнуть непереборні спотворення субдіскретізації. Усунути їх фільтром нижніх частот після ЦАП буде неможливо. Звучання фонограми буде безнадійно зіпсоване. Корисно кількісно визначити $\mathbf{P_с/P_{ш.кв}}$ на виході пристрою квантування, щоб запропонувати способи його збільшення (що веде в свою чергу до поліпшення якості оцифрованого звукового сигналу).

Оскільки величина $\mathbf{P_{ш.кв}}$ не залежить від рівня вхідного сигналу, то зі збільшенням потужності вхідного сигналу $\mathbf{P_с}$ відношення $\mathbf{P_с/P_{ш.кв}}$ лінійно зростає до тих пір, поки не виникне шум обмеження. Його поява різко зменшує $\mathbf{P_с/(P_{ш.кв} + P_{ш.обм})}$.

Тому система кодування повинна бути побудована так, щоб обмеження сигналу практично не було між ними.

Для цього поріг обмеження квантованного пристрою $\mathbf{U_{обм}}$ повинен дорівнювати квазімаксимальному значенню сигналу $\mathbf{U_{с.макс}}$, тобто

$$\mathbf{U_{обм} = U_{с.макс} = \Pi U_{ср}} \qquad (11.3)$$

Тут $\mathbf{U_{ср}}$– середньоквадратичне значення звукового сигналу, а $\mathbf{\Pi}$ – його пік-фактор.

На практиці, щоб уникнути обмеження сигналу (і виникнення шуму обмеження) його квазіпікове значення $\mathbf{U_{с.макс}}$ вибирається на 6 ... 10 дБ менше $\mathbf{U_{обм}}$.

Число кроків квантування $\mathbf{\Pi}$ на відрізку від 0 до $\mathbf{U_{обм}}$ дорівнює

$$\boldsymbol{n = 2(|U_{обм}|/\Delta) + 1 \approx U_{с.макс} = 2(|U_{обм}|/\Delta)} \qquad (11.4)$$

Після визначення Δ з (11.4) і підстановки в (11.2) з урахуванням (11.3) отримаємо:

$$\mathbf{P_{ш.кв} = \Pi^2 U^2_{обм}/(3n^2) = \Pi^2 U^2_{ср}/(3n^2)} \qquad (11.5)$$

Оскільки $\mathbf{P_c}$ пропорційна $\mathbf{U_{ср}^2}$, то

$$\mathbf{P_c/P_{ш.кв}} = 3n^2/\Pi^2$$

або в децибелах

$$\mathbf{P_c/P_{ш.кв}} = 20\lg(n/\Pi) + 4{,}8 \ [\text{дБ}].$$

З урахуванням співвідношення $n = 2^m$

$$\mathbf{P_c/P_{ш.кв}} = 6m - 20\lg(\Pi) + 4{,}8 \ [\text{дБ}] \qquad (11.6)$$

З (11.6) випливає, що при рівномірному квантуванні збільшення числа розрядів м на одиницю відношення $\mathbf{P_c/P_{ш.кв}}$ підвищується на 6 дБ.

Для звукових мовних сигналів значення пікфактора **П** залежить від жанру програми і змінюється від **7** до **25** дБ. В середньому вважається, що **П** = 12 ... 15 дБ. Відповідно до Рекомендації МСЕ-Р 468-3 для розрахунків (!) приймається **П** = 12 дБ.

Тоді орієнтовно

$$\mathbf{P_c/P_{ш.кв}} = 6m - (7{,}2 \ldots 10{,}2) \ [\text{дБ}]$$

Відзначимо, що це співвідношення не враховує неоднакову чутливість слуху до складових шуму різних частот, що визначаються псофометричним коефіцієнтом. З його урахуванням (для широкосмугового звукового сигналу з смугою частот 15 кГц) відношення $\mathbf{P_c/P_{ш.кв}}$ зменшується ще на 8,5 дБ і становить

$$\mathbf{P_c/P_{ш.кв}} = 6m - (15{,}7 \ldots 18{,}7) \ [\text{дБ}]$$

Залежність $\mathbf{P_c/P_{ш.кв}}$ від нормованого (щодо $\mathbf{U_{с.макс}}$) рівня сигналу для різних *m* відображає рис.11.6.

Вираз для відношення $\mathbf{P_c/P_{ш.кв}}$ в кінцевому підсумку визначає значення максимального динамічного діапазону звукового сигналу, який може бути переданий по цифровому каналу без прояви спотворень. На практиці в трактах формування програм "звукозапису зазвичай використовується 16-розрядне кодування при рівномірному квантуванні. Згідно (11.6) для m = 16 і **П** = 12 дБ величина $\mathbf{DD_{ЗС}}$ = (6·16 - 12 + 4,8) - 2 - 20 - 10 = 56,8 дБ.

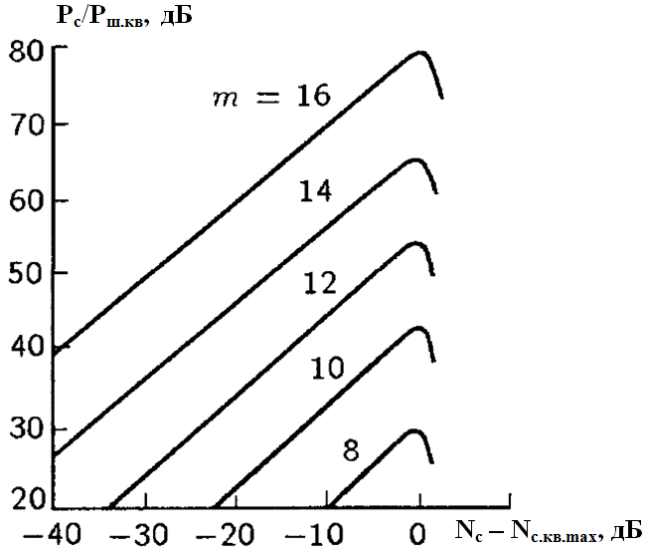


Рис.11.6 Залежність $\mathbf{P_c/P_{ш.кв}}$ від нормованного рівня сигналу для різних *m*

Тут після величин у дужках враховано:

- запас на похибку, властиву АЦП і ЦАП (2 дБ),
- потрібне перевищення сигналу над шумами на приймальному кінці (20 дБ), щоб забезпечити маскування шумів квантування корисним сигналом при зворотному перетворенні, і
- перевищення порога обмеження при квантуванні (10 дБ) для захисту каналу від можливого перевищення максимального рівня. Викладене ілюструє рис. 11.7.

Відзначимо, що після обробки звукового сигналу звукорежисером динамічний діапазон зазвичай не перевищує 40 дБ в радіомовлення і 50 дБ при високоякісної запису (наприклад, на компакт-диск). Додамо, що звукорежисери рідко виходять за згадані межі $\mathbf{DD_{ЗС}}$ = 50 дБ не стільки з технічних причин, скільки з творчих міркувань.

Звернемо увагу на ще одну особливість рівномірного багаторозрядного квантування. На число можливих ступенів квантування впливає обмежена роздільна здатність АЦП, а також часова точність при дискретизації. Якщо миттєве значення сигналу змінюється дуже швидко, то положення часової точки дискретизації може вплинути на зареєстрований відлік.

Наприклад, часова неточність зняття відліку сигналу 160 мкс з частотою 1 кГц відповідає помилці квантування вже при m = 10.

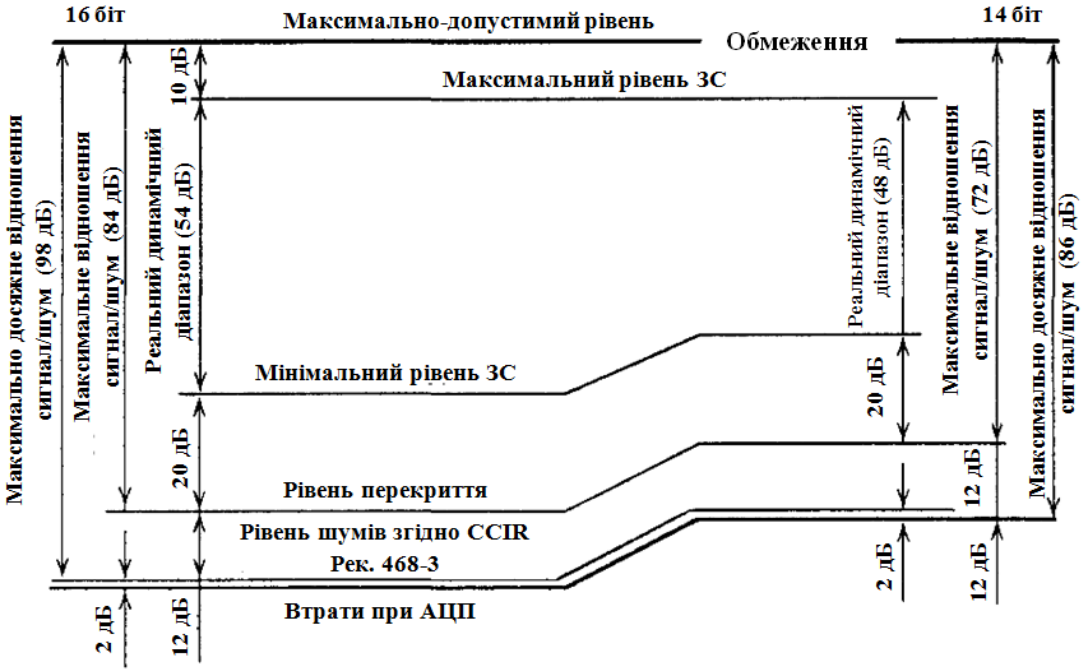


Рис.11.7 Динамічний діапазон звукового сигналу при АЦП

При безпосередньому прямому рівномірному АЦП з m = 16 (число можливих рівнів становить 65536) необхідно, щоб постійні порівнювані в АЦП напруги мали малу похибку. Для переконливості відзначимо, що при максимальному значенні амплітуди вхідного сигналу $\mathbf{U_{с.макс}}$ = 1 В для кожної

окремої ступені квантування потрібна точність не менше 0,00001 В. Така точність має бути реалізована в смузі частот до 20 кГц.

Застосування у професійній та високоякісній побутовій апаратурі 16-розрядного квантування викликано бажанням зменшити помилки квантування і обумовлені ними спотворення звуку.

При 16-розрядному квантуванні і частоті дискретизації $\mathbf{f_д}$ = 48 кГц швидкість передачі цифрового потоку складає $\mathbf{mf_д} = 16 \cdot 48 = 768$ кбіт / с для монофонічному сигналу і вдвічі більше (1536 кбіт/с) для стереофонічного («двоканального»). При $\mathbf{f_д}$ = 44,1 кГц маємо відповідно 705 кбіт/с і 1411,2 кбіт / с.

Велика кількість розрядів при високій тактовій частоті, як показано вище, вимагає високошвидкісних каналів передачі. Для передачі цифрового сигналу по каналу бажано знизити розрядність сигналу.

Швидкість передачі цифрових мовних сигналів може бути знижена при застосуванні нерівномірного квантування.

4. Рівномірне квантування. Нерівномірне квантування

При рівномірному (лінійному) квантуванні крок квантування постійний в межах усього динамічного діапазону. **При *нерівномірному квантуванні* крок квантування вибирається малим при малих рівнях сигналу і великим - при великих.**

Зрозуміло, що разом зі зміною рівня сигналу (і кроку квантування) змінюється і потужність шумів квантування. Вона зростає зі зростанням рівня сигналу. Отже, відношення $\mathbf{P_с/P_{ш.кв}}$ у всьому діапазоні рівнів має бути таким, щоб шуми квантування залишалися нечутними. *Нерівномірне квантування дозволяє зменшити необхідне число розрядів у кодовому слові при кодуванні відліків і тим самим знизити швидкість передачі.*

Ефект нерівномірного квантування може бути отриманий за допомогою стиснення $\mathbf{DD_{ЗС}}$ з наступним рівномірним квантуванням. Стиснення динамічного діапазону здійснюється за допомогою компресора, що володіє нелінійною амплітудною характеристикою.

Принцип дії компресора аналогічний функціонуванню ланцюгів автоматичних регулювань підсилення в радіоприймачах.

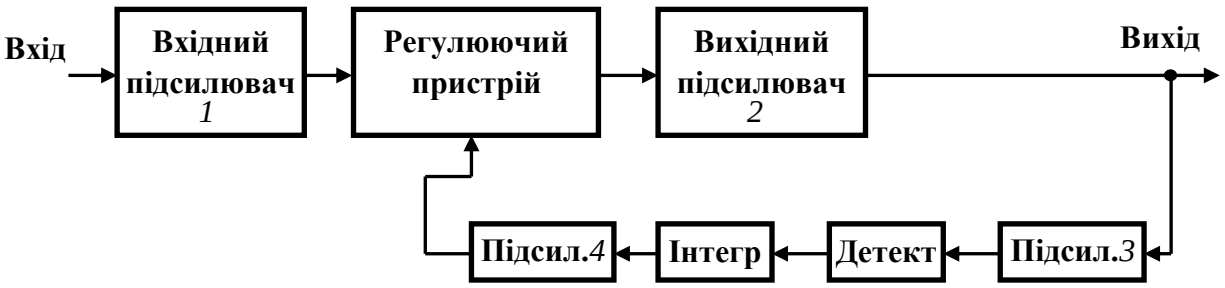


Рис. 11.8 Загальна схема автоматичного регулятору рівня сигналу (компандера)

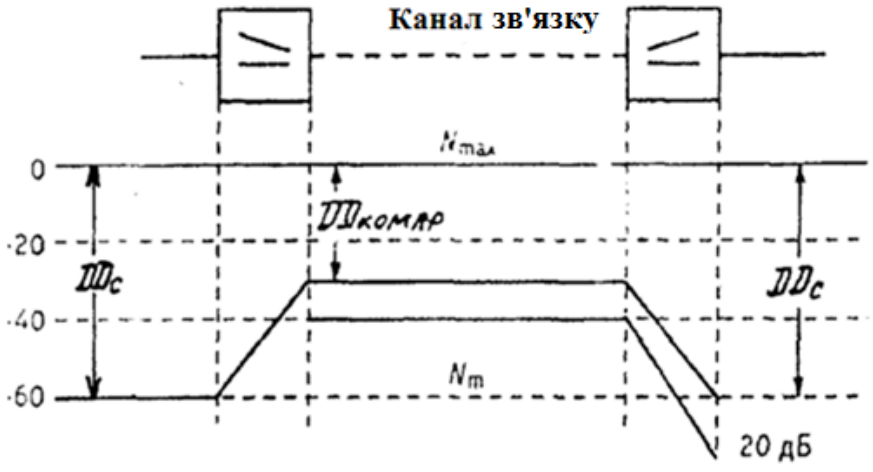
Вхідний сигнал після підсилювача 1 подається на регулюючий пристрій. Регулюючий пристрій виконує необхідне регулювання коефіцієнта передачі відповідно до необхідного закону регулювання. Вихідний підсилювач 2 відновлює потрібний максимальний рівень вихідного сигналу, робить його рівним вхідному (в іншому випадку порушиться співвідношення сигнал/шум в каналі передачі). Розв'язувальний підсилювач 3 забезпечує необхідний для детектування рівень сигналу. Разом з детектором вони перетворюють низькочастотний сигнал у керуючу напругу певної полярності, що відносно повільно змінюється. Підсилювач постійного струму 4 є джерелом напруги керування для регулюючого пристрою.

Зі зростанням рівня вхідного сигналу рівень вихідного сигналу змінюється не пропорційно, а все з меншим коефіцієнтом передачі. Тому динамічний діапазон вихідного сигналу менше динамічного діапазону вхідного сигналу. Відношення другого до першого (в децибелах) і визначає коефіцієнт стиснення компресора (зрозуміло, що він більше за 1).

На приймальному кінці мовного каналу повинен бути включений ***експандер*** (розширник): рівень вхідного сигналу після експандеру повинен змінюватися за тим же законом, як і рівень вхідного сигналу до компресії, тобто величина вихідного динамічного діапазону повинна бути відновлена. Сукупність компрессора з експандером іменується ***компандером.***

Принцип роботи компандерної системи ілюструє рис.11.9.

а) функціонування компресора та експандеру



б) перехідні процесори в компресорі

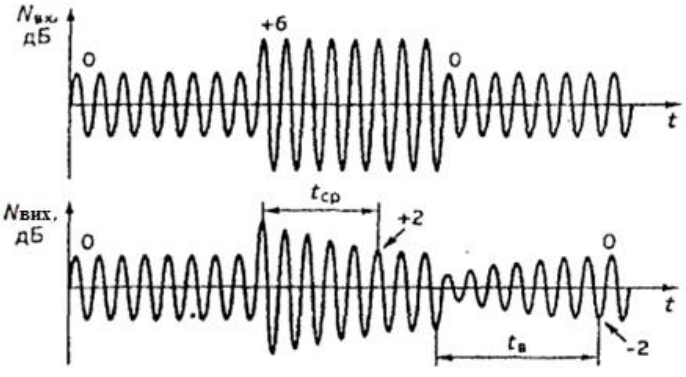


Рис.11.9 Принципи роботи компандерної системи

Нехай, наприклад, динамічний діапазон звукового сигналу 60 дБ, а рівень сигналу в каналі передачі дорівнює -40 дБ. Зрозуміло, що якщо рівень шуму в каналі перевищує рівень слабких сигналів на 20 дБ (тобто складе - 40 дБ), то вони будуть «приховані» в шумах. Якщо коефіцієнт стиснення компресора дорівнює 2, то слабкий сигнал піднімається з -60 дБ до рівня -30 дБ, що на 10 дБ вище рівня шуму в каналі. У пункті приймання розширювач (експандер) відновить вихідний динамічний діапазон (якщо, звичайно, коефіцієнт розширення буде рівним 2), а рівень шуму на виході розширювача при проходженні слабких сигналів опиниться на 20 дБ нижче рівня цих сигналів. Або інакше: **застосування компандера дозволяє передати сигнал мовлення по каналу, динамічний діапазон якого менше динамічного діапазону самого сигналу. При цьому середній виграш у відношенні сигнал/шум складає 10 ... 13 дБ.**

Недоліком компандера є поява на його виході ефекту модуляції сигналу шумом. Дійсно, в компандері ступінь придушення шуму визначається рівнем корисного сигналу. Максимальне зниження шумів має місце при слабких сигналах. При максимальних же рівнях сигналу відношення сигнал/шум не змінюється. Отже, рівень шуму на виході змінюється в такт з сигналом.

При співпадінні спектрів сигналу і шуму ця обставина не позначається на сприйнятті, тому що шум маскується сигналом. Якщо ж спектри не збігаються, то шум сигналом не маскується. Такий шум отримав назву *програмно-модульованого*. Зокрема, при передачі низькочастотних сигналів (наприклад, при грі басових інструментів) високочастотний шум починає змінюватися за рівнем в такт з цим низькочастотним сигналом і тому є особливо помітним. При передачі ж скрипкових сигналів шум розглянутої природи не прослуховується. І цей недолік не єдиний.

Іншим недоліком компандерной системи є поява викривлень у перехідних режимах від одного рівня до іншого. Викривлення можуть виникнути через розбіжність частотних і фазових характеристик компандера і експандера, а також через труднощі вибору прийнятних постійних часу ланцюгів регулювання (швидкість наростання і спаду напруг керування, що надходять до регулюючого пристрою).

Дійсно, перехідний процес повинен бути настільки коротким, щоб при стрибкоподібному збільшенні рівня вхідного сигналу не виникало викидів, що призводять до перевантаження у трактах. Для цього постійна часу ланцюга управління не повинна перевищувати чверті періоду максимальної частоти сигналу, що при частоті 20 кГц складає 12,5 мкс. З іншого боку, щоб уникнути нелінійних спотворень низькочастотних складових сигналу швидкість зміни коефіцієнта передачі повинна бути досить малою (при допустимому коефіцієнті нелінійних спотворень 0,2% на частоті 20 Гц не повинна перевищувати 6 дБ/с). При діапазоні регулювання в 30 дБ потрібний час відновлення ($t_п$ на рис.11.9,б) складає близько 5 с. Час відновлення відрізняється від часу спрацьовування в 400000 разів! При такому розходженні пошук «оптимального» компромісу при виборі постійних часу регулювання дуже скрутний.

Один з варіантів вирішення такого завдання реалізований в шумопридушувачі Долбі. Блок регулювання Долбі складається з чотирьох компресорів, кожен з яких стискає динамічний діапазон сигналу не в загальній смузі частот 30... 20000 Гц, а в більш вузьких смугах: 30...80, 80...3000, 3000...20000 і 9000... 20000 Гц. Для кожної смуги підбирається своя стала часу регулювання. Відношення постійних часу відновлення та спрацювання істотно (приблизно в 100 разів) менше, ніж у односмуговому компандері. Істотно знижуються і динамічні нелінійні спотворення.

Кожен компандер працює як окремий шумопридушувач. Якщо спектр вхідного сигналу зосереджений у межах смуги пропускання одного з фільтрів (до регулюючого пристрою), то тільки в одному з компандеров відношення сигнал/шум залишиться незмінним. У трьох інших відбуватиметься шумопридушення, і сигнал, зосереджений у межах смуги одного з компандеров не буде керувати рівнем шуму в інших. При цьому не створюються умови для появи програмно-модульованого шуму.

Найбільш поширені два способи формування нерівномірної шкали квантування - *миттєве* і *майже миттєве* відрядження.

5. Миттєве компандування. Майже миттєве компандування

5.1 Миттєве компандування

Пристрій, що реалізує нерівномірне квантування з використанням миттєвого компандування складається з послідовно включених стиснювача, пристрою квантування з рівномірною шкалою квантування і розширювача, рис. 11.10, а.

Сигнал з виходу стиснювача піддається рівномірному квантуванню. Нормалізована характеристика стискання показана на рис.11.10,б (крива 1). Вона показує, що квантування цього сигналу з рівномірним кроком відповідає нерівномірному квантуванню вхідного сигналу. Розширювач включається на приймальній стороні цифрового тракту після цифро-аналогового перетворювача.

а) структура нерівномірного квантувача

б) нормалізовані характеристики стиснювача(1) та розширювача (2)

в) співвідношення сигнал/шум без використання (1) та з використанням (2) компандеру

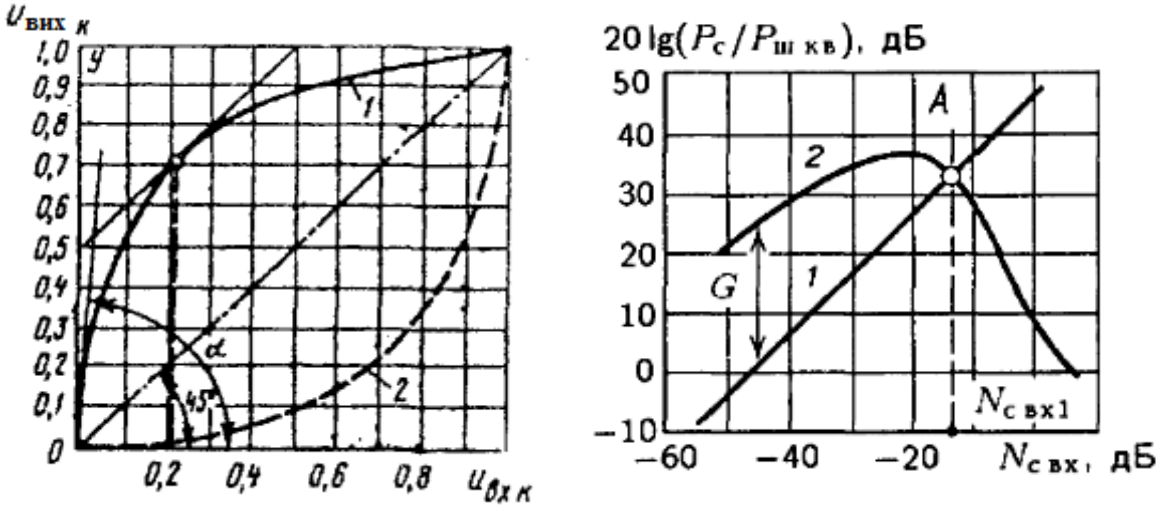


Рис.11.10 Структурна схема пристрою нерівномірного квантування при миттєвому компандуванні та його характеристики

Ще раз відзначимо, що коефіцієнти передачі стиснювача $К_{ст}$ і розширювача $К_{розш}$ повинні бути пов'язані співвідношенням $К_{ст} \cdot К_{розш} = 1$ во всьому динамічному діапазоні вхідних рівнів сигналу. Стиснювач є безінерційним пристроєм миттєвої дії (звідси й назва миттєвого компандування).

Виграш, тобто збільшення $\mathbf{P_c/P_{ш.кв}}$ тим більше, чим більше нахил початкової ділянки кривої стиснення в порівнянні з прямою, що проходить під кутом 45°. На кінцевому ділянці кривої 1 кут нахилу менше 45°. Спаданню нахилу кривої 1 по мірі зростання рівня сигналу тягне за собою зменшення відношення $\mathbf{P_c/P_{ш.кв}}$.

Виграш від застосування нерівномірного компандера (крива 2) у порівнянні з рівномірним квантуванням (крива 1) для 128-інтервального квантувача відображено на рис.11.10, в.

Пошук оптимального закону стиснення, при якому відношення $\mathbf{P_c/P_{ш.кв}}$ буде залишатися постійним в найбільшому діапазоні зміни вхідних рівнів, приводить до висновку, що його не існує.

На практиці використовується два закони стиснення типу А (європейський стандарт):

$$y = A|x|/(1+\ln A) \text{ коли } 0 \le |x| \le 1/A$$

$$y = \big(1+\ln(A|x|)\big)/(1+\ln A) \text{ коли } 1 </A|x| \le 1, \text{де } A = 87{,}6;$$

і типу μ (північноамериканський стандарт):

$$y = \ln(1+\mu|x|)/\ln(1+\mu) \text{ коли } 0 \le |x| \le 1, \text{де } \mu = 255.$$

В даний час в системах кодування звукових сигналів відмовляються від аналогових компандерів, замінюючи їх цифровими: плавна характеристика стиснення замінюється апроксимуючою лінійно-ламаною характеристикою. Залежно від числа використовуваних сегментів (відрізків прямих ліній) та виду закону стиснення цю лінійно-ламану залежність позначають буквою і двома цифрами. Наприклад, запис А 87,6/7 означає апроксимацію А по-закону (А = 87,6) з сімома апроксимуючими відрізками (сегментами), табл. 11.2.

Таблиця 11.2. Кусково-лінійне компандування

Рівень вхідного сигналу	Номер сигналу	Крок квантування
0…7	0	Δ
8…15	1	Δ
16…31	2	2Δ
32…63	3	4Δ
64…127	4	8Δ
128…255	5	16Δ
256…511	6	32Δ
512…1023	7	64Δ

В межах кожного сегмента крок квантування постійний, але при переході від одного сегменту до іншого він змінюється в 2 рази. Число рівнів квантування в межах кожного сегмента постійне.

Процедура кодування кожного відліку в цьому випадку зводиться до наступного. Спочатку визначається полярність «напівхвилі сигналу» та в залежності від неї формується символ пешого розряду (0 та 1) кодового слову.

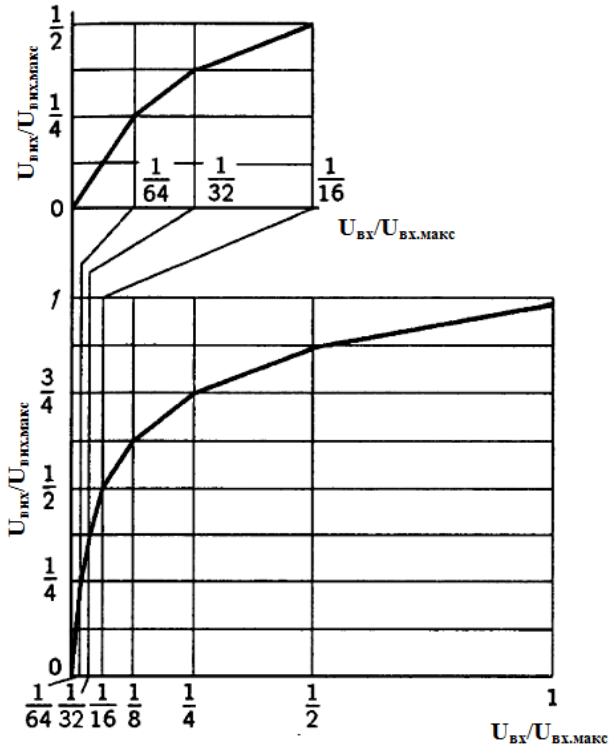


Рис.11.11 Кусково-лінійна апроксимація характеристики компресії за А-законом.

Потім у двійковому коді видається номер сегмента, в межах якого знаходиться рівень вхідного сигналу (для кодування номера потрібні трехразрядние комбінації).

Далі кодується рівень сигналу в межах сегменту. Якщо число таких рівнів у межах сегмента дорівнює 64, то для кодування номера рівня необхідна шестирозрядна кодова комбінація. Загальна кількість розрядів в кодовому слові складе 10: перший розряд – полярність сигналу, наступні три – номер сегмента, останні шість – номер рівня в межах сегменту. За переданою кодовою комбінацією повинен працювати експандер на приймальній стороні.

На рис.11.12 для прикладу наведена залежність відношення сигнал/шум квантування ($\mathbf{P_c/P_{ш.кв}}$) від відносної зміни рівня тонального сигналу на вході стиснювача (компресора) за відсутності зжимання (крива 1), 12-сегментної апроксимації А по-закону (крива 2) і 11-сегментної апроксимації по μ-закону (крива 3). Рівномірне квантування прийняте 14-розрядним, а нерів-номірне – 11-розрядним.

Для середніх і великих рівнів відношення сигнал / шум квантування при стисненні динамічного діапазону компресором залишається приблизно постійним (криві 2 і 3) і досить високим.

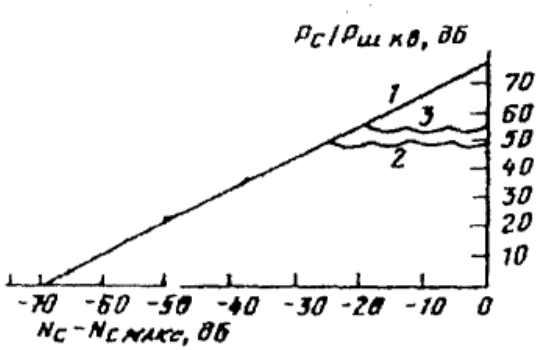


Рис.11.12. Залежність відношення сигнал/шум квантування від відносного рівня сигналу на вході компресора.

Компресія дозволила знизити розрядність кодового слова з 14 до 11 (14/11) і, як наслідок, знизити швидкість цифрового потоку приблизно на 20% у порівняння з випадком рівномірного квантування.

При смузі частот переданого мовного сигналу 15 кГц, $\mathbf{f_д}$ = 32 кГц і **m** = 11 швидкість цифрового потоку становитиме 352 кбіт/с для монофонічної передачі і 704 кбіт/с – для стереофонічної (при використанні двох рівноцінних каналів **Л** і **П**). Тут не враховані додаткові біти (для синхронізації, а також для виявлення та виправлення помилок); їх наявність додатково збільшує необхідну для передачі високоякісних сигналів мовлення швидкість цифрового потоку.

5.2 Майже миттєве компандування

Чутливість людського вуха залежить від рівня гучності звуку, і потрібен якийсь час для адаптації, щоб була досягнута максимальна чутливість слуху після дії сигналів великих рівнів. Дана особливість дозволяє (при цифровій передачі максимальних рівнів) не враховувати «тонкої» ступінчастості бітів з низькою значущістю.

Якщо рівні сигналів малі, то найбільші значення бітів (старших розрядів у співвідношенні (11.1)) *дорівнюють нулю, і їх можна не передавати*. Навпаки, при великих рівнях сигналів низькі значення бітів дають дуже малий внесок у загальний рівень, і їх можна не передавати, навіть якщо згідно (11.1) вони не дорівнюють нулю.

Зрозуміло, що для правильного відновлення відліків необхідно знати, біти яких розрядів передаються і які значення коефіцієнтів масштабу для найбільшого і найменшого ступенів квантування. Знайдено, що відповідно до інерційності вуха досить погодити це масштабування в мілісекундному інтервалі (саме цей інтервал відображають слова «майже миттєво»). Подібну систему адаптивної ІКМ часто називають блоковою ІКМ, або NIC - Near Instantaneous Companded.

При майже миттєвому компандуванні зазвичай використовується ***п'ять різних шкал квантування*** з рівномірним кроком всередині кожної шкали. При переході від однієї шкали до іншої змінюється крок квантування, рис.11.13, а.

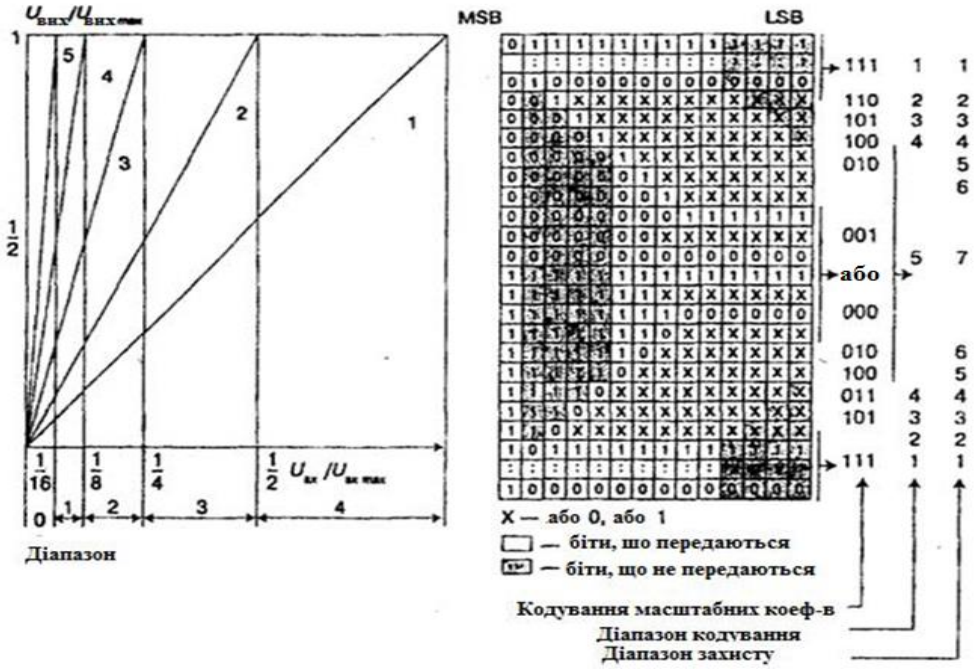


Рис.11.13 Нерівномірні шкали квантування при миттєвому командуванні (а) та перетворенні 14/10

Вибір тієї чи іншої шкали визначається значенням *максимального рівня сигналу* за час 1 мс. На даному інтервалі часова функція звукового сигналу залишається більш-менш однорідною і не зазнає різких змін за амплітудою.

Мінімальний крок квантування має шкала 5 (діапазон вхідніх сигналів 0), максимальний – шкала 1 (діапазон вхідних сигналів 4). Число кроків

квантування в кожній шкалі однакове і дорівнює 512 (для однієї полярності звукового сигналу). Тому кодові слова, які відповідають кожному відліку, містять 10 розрядів.

Пояснимо процедуру кодування на прикладі сигналу з частотою дискретизації 32 кГц.

Спочатку сигнал мовлення кодується з мінімально можливим кроком квантування з роздільною здатністю 14 біт/відлік з рівномірною шкалою квантування. Вибірки з 32 відліків 14-розрядних слів (що відповідає тривалості 1 мс) запам'ятовуються, а потім (залежно від найбільшого значення відліку всередині кожної вибірки) 4 розряди з 14 відкидаються. Для найменших рівнів (діапазон 0 на рис. 8.13,а) відкидаються 4 старших розряди (в передачі чотирьох нулів у старших розрядах співвідношення (8.1) немає потреби). *Відкидання одного молодшого і трьох старших розрядів відповідає збільшенню кроку квантування в два рази (діапазон 1), двох молодших і двох старших – в 4 рази (діапазон 2), трьох молодших і одного старшого – у 8 разів (діапазон 3) і, нарешті, 4 молодших – в 16 разів (діапазон 4, шкала 1).*

Таким чином, при майже миттєвому відрядженні крок квантування залежить не від миттєвого значення сигналу, а від його максимального значення на інтервалі часу, що дорівнює 1 мс.

Кожен блок з 32 відліків супроводжується службової комбінацією з 3 біт, що визначає, яка з шкал квантування використовувалася при передачі всіх відліків цього блоку. Це необхідно для правильного відновлення на приймальній стороні абсолютного значення кожного відліку Після цього повна швидкість передачі виявляється рівною 323 кбіт/с (а не 352 кбіт/с) на моноканал, а відношення сигнал/шум квантування на 3 дБ кращим, ніж при 11-розрядному кодуванні з миттєвим компандуванням.

У Рекомендаціях 660, 718 і 719 МСЕ-Р розглянуті варіанти майже миттєвого компадування з урахуванням додаткових біт (синхронізації та надлишкового коректуючого коду). Швидкості передачі (на моно канал 15 кГц при $\mathbf{f}_{\text{д}}$ = 32 кГц) для цих варіантів дорівнює відповідно 384, 320 і 496 кбіт/с.

Подібна технологія одержала найменування "*кодування цифрових сигналів мовлення з плаваючою комою».*

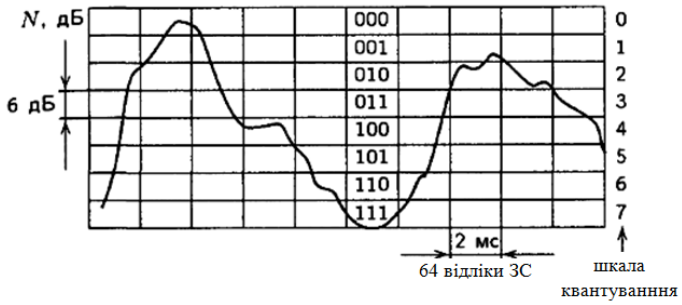
Викладена технологія має англомовну абревіатуру; CAM (кодування шляхом майже миттєвого компандування) або D2-VAC (подвійне бінарне кодування з ущільненням аналогових компонент) і використовується, зокрема, для передачі звуку в телебаченні і при супутниковому радіомовленні (система DSR). При цифровому супутниковому радіомовленні DSR застосовується відповідно 16/14-бітова техніка з плаваючою комою.

Вихідний цифровий звуковий сигнал з 16-бітовим лінійним розрішенням і частотою дискретизації 48 кГц (звичайні параметри цифрового студійного факту) перетворюються з використанням методу плаваючої коми в 14-бітові кодові слова з частотою дискретизації 32 кГц, рис.11.14.

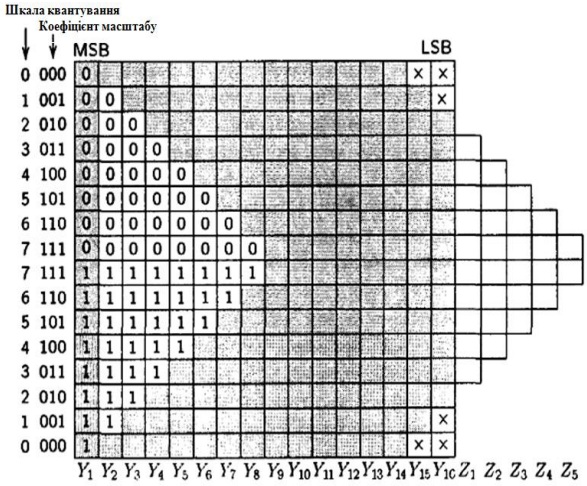
Масштабний коефіцієнт передається один раз для блоку з 64 відліків тривалістю 2 мс. Як і при майже миттєвому компандуванні, всередині часових

віконець тривалістю 2 мс знаходиться максимальний рівень сигналу (максимальна «амплітуда» відліку вибірки), яка визначає відповідну йому область зміни амплітуд сигналу і значення масштабного коефіцієнта. Передбачено 8 можливих областей (сегментів) зміни модуля рівнів відліку і відповідно 8 масштабних коефіцієнтів. Кожен коефіцієнт може бути представлений трьохбітовим двійковим числом (у межах від 000 до 111). Це число визначає діапазон зміни рівнів сигналу для кожного "значення коефіцієнта масштабу. Кожній з 8 використовуваних шкал квантування відповідає зміна рівня сигналу на 6 дБ, рис.11.14, а.

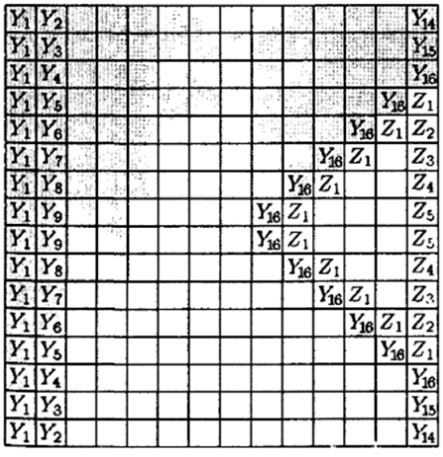
а) кодування масштабних коефіцієнтів в залежності від рівня сигналу



б) кодування відліків звукового сигналу



в) формат передачі по каналу



— біти, що передаються **— біти, що не передаються**

Рис. 11.14 Перетворення 16-бітових кодових слів в 14-бітові з плаваючою комою

Стратегія перетворення 16/14 полягає в наступному. Лише в місцях гучного сигналу біти старших розрядів вхідного 16-розрядного кодового слова не будуть дорівнювати нулю, навпаки, при тихих пасажах (що відображаються малими числами) основні відомості про рівень мовного сигналу містяться в бітах молодших розрядів, які не завжди дорівнюють нулю.

Рис.11.14,б,в відображає перетворення 16-бітових слів у 14 бітове. Перший біт (0 або 1) містить інформацію про знак відліку і повинен передаватися завжди. Це – самий старший значущий біт (MSB).

Останній біт – молодший значущий біт (LSB). Біти від Y2 до Y8, ідентичні за значенням з першим знаковим бітом (їх число змінюється від нуля до семи в залежності від амплітуди сигналу та відповідного їй коефіцієнта масштабу), при передачі викидаються, а всі наступні розряди зсуваються ліворуч. Це дає можливість передавати наймолодші (15-й і 16-й) розряди при малих рівнях сигналу. І тільки при найвищих рівнях губляться один або два молодших біта (вони при великих амплітудах незначущі). Зауважимо (див. рис. 8.14, в), що для сигналів найменших амплітуд можна працювати з роздільною здатністю до 21 біта.

Масштабний коефіцієнт довжиною 3 біта вказує, скільки бітів слід за знаковим бітом у всіх кодових словах блоку (що складається з 64 відліків), і має те ж саме значення (0 або 1), що і знаковий (див. два лівих стовпця цифр на рис. 11.14,б).

Біти, пронумеровані як Z_1 ... Z_5 є резервними. Їх призначення поки не визначено.

На приймальному кінці масштабний коефіцієнт використовується для зрушення розрядів в кодових словах блоку в їх початкове положення: так відбувається відновлення вихідних 16-бітових кодових слів.

6. Передспотворення при цифровій передачі мовних сигналів

При малому кроці квантування спектр шуму квантування виявляється рівномірним від нуля до $0{,}5\mathbf{f}_{\mathbf{д}}$, тоді як спектр реальних звукових сигналів звичайно має значний спад в області верхніх частот.

При передачі через цифрову систему музичних пасажів, виконуваних інструментами, спектр яких лежить переважно в області високих частот, *відношення сигнал/шум помітно зменшується в порівнянні з максимальними значеннями*.

Для боротьби з цим явищем застосовуються частотні передвикривлення сигналу на стороні передачі та його відновлення після декодування.

Рекомендація МСЕ-Р 651 (для лінійного квантування з 14-бітовим розрішенням, а також для нелінійного квантування з майже миттєвим компандуванням) передбачає, що для зменшення розрядності (з 14 до 10 біт) високоякісних мовних сигналів з смугою 15 кГц передвикривлення повинні

відповідати Рекомендації J .17 МСЕ-Т (для Району 1) із загасанням 6,5 дБ, що вноситься на частоті 800 Гц згідно співвідношенню:

$$K = 10\lg[(1 + (2\pi F/3000)^2)/(75 + (2\pi F/3000)^2)]$$

Ця залежність представлена графічно на рис.11.15. На стороні передачі предвикривлення формуються контуром передвикривлення, а на приймальній стороні компенсуються контуром відновлення. Шум квантування проходить тільки через контур відновлення, завдяки чому відношення сигнал/шум вирівнюється по спектру.

Суб'єктивно поліпшується сприйняття високочастотних компонент мовного сигналу слухачем. Кількісно величина $\mathbf{P_c/P_ш}$ зростає приблизно на 4 дБ.

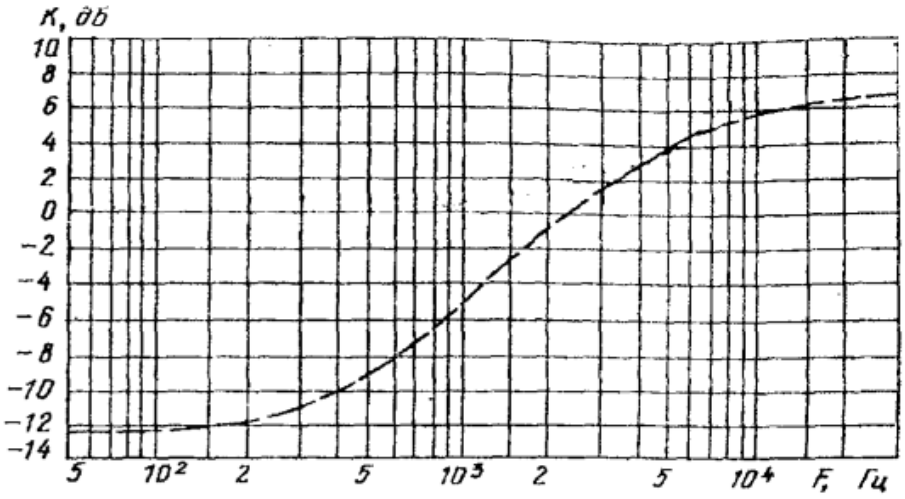


Рис.11.15. Характеристика спотворень

Питання для самоконтролю

1. Аргументуйте вибір частоти дискретизації для оцифровування аналогових сигналів звукового мовлення.
2. Дайте характеристику процедури квантування аналогового сигналу. З якою метою використовується нерівномірне кодування?
3. Аргументуйте вибір параметрів коду при оцифровуванні відліків аналогового сигналу мовлення.
4. Що таке шум квантування? Аргументуйте, як пов’язано відношення сигнал/шум квантування ($P_c/P_{ш.кв}$) з параметрами кодування цифрових сигналів мовлення.
5. Аргументуйте, які задачі вирішуються при нерівномірному квантуванні (кодуванні).
6. Аргументуйте, як правильно обрати параметри компандування сигналу мовлення. Поясніть принцип функціонування компандера.
7. Аргументуйте доцільність передспотворень при цифровій передачі звукових сигналів мовлення.
8. Дайте характеристику майже миттєвого компандування. Які цілі воно переслідує?

ДОДАТОК Й. РИСУНКИ ДО ЛЕКЦІЇ №11

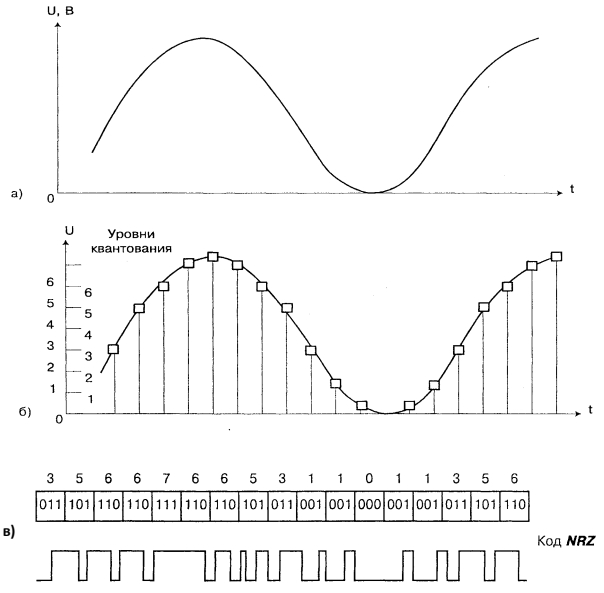


Рис. 12.1. К цифровому представлению звуковых сигналов: *а* – исходный аналоговый ЗС; *б* – представ-ление непрерыв-ного сигнала дискретной последовательностью отсчетов (ИКМ-сигнал); *в* – кодирование отсче-тов в двоичной системе счисления и передача кодовых слов ступенчато изменяющимся во времени напряжением

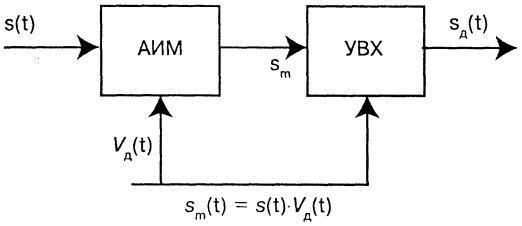


Рис.12.4. Схема дискретизатора

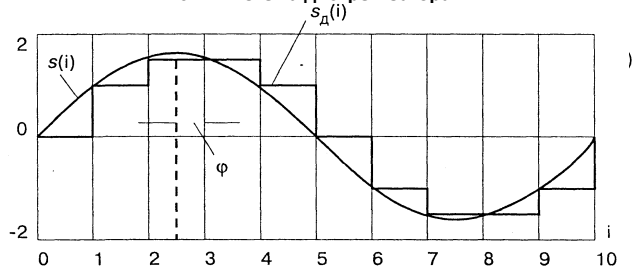


Рис.12.5. Дискретный синусоидальный сигнал на выходе УВХ

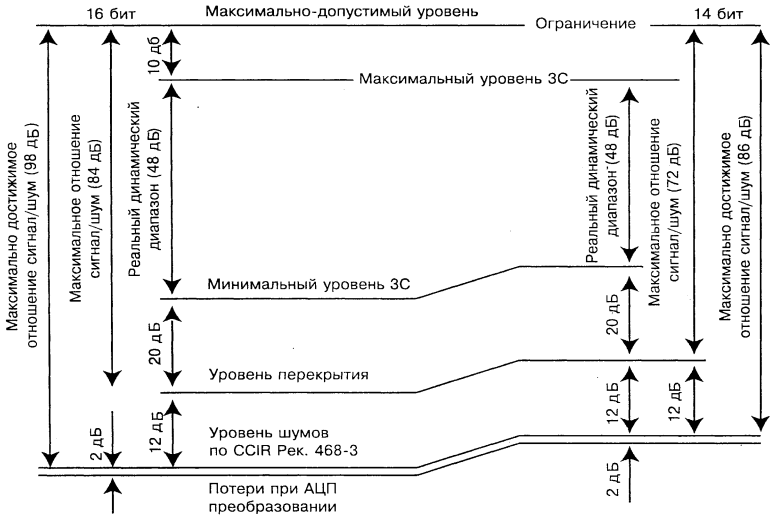


Рис.12.10. Динамический диапазон звукового сигнала при АЦП

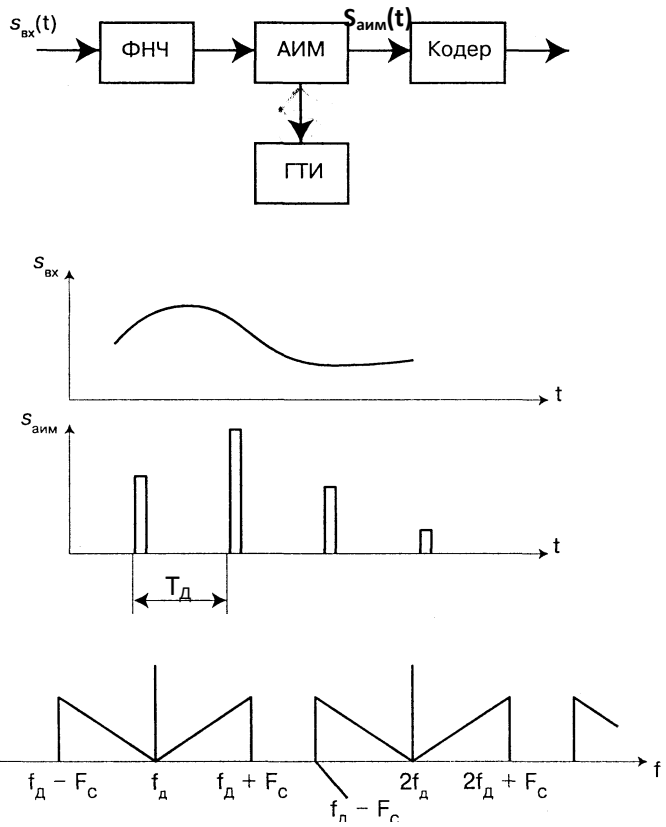


Рис.12.2. *а* – устройство, осуществляющее ИКМ; *б* – временная диаграмма процесса ИКМ; в – спектр дискретизированного сигнала;

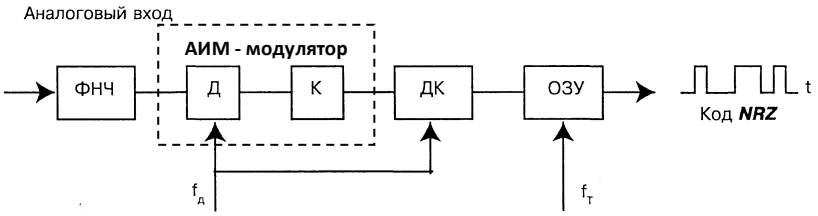


Рис.12.3. Подробная схема ИКМ-модулятора

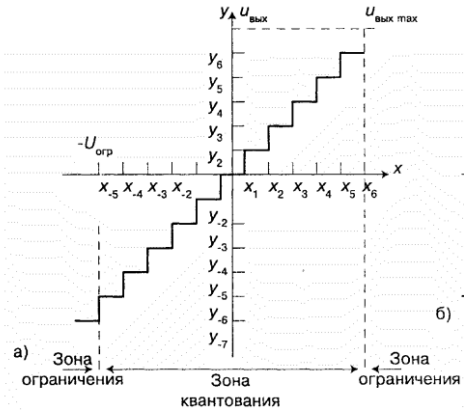


Рис.12.6. Равномерная шкала квантования

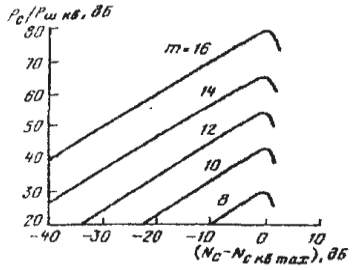
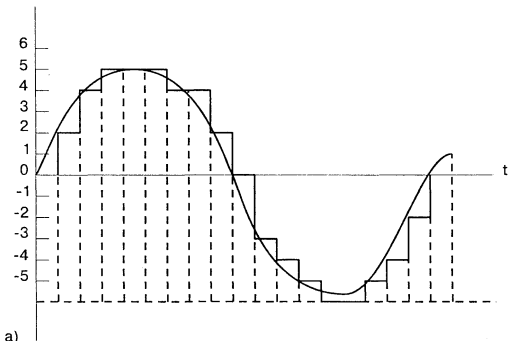


Рис.12.8. Зависимость $P_c/P_{ш.кв}$ от нормированного уровня сигнала для разной разрядности квантования *m*



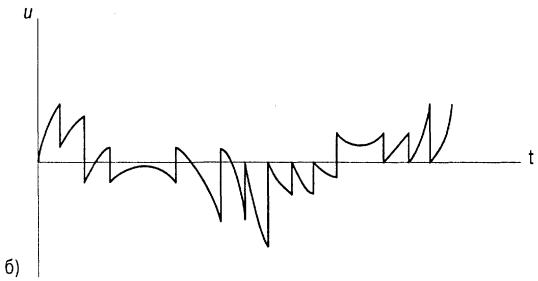


Рис.12.7. К появлению шумов (искажений) квантования: *а* – квантование непрерывного сигнала; *б* – изменяющаяся во времени разность между мгновенными и квантованными значениями сигнала (погрешность квантования)

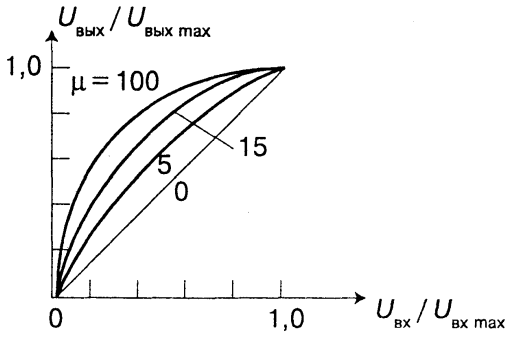


Рис.12.14. Характеристика компрессии при *μ*–законе компандирования

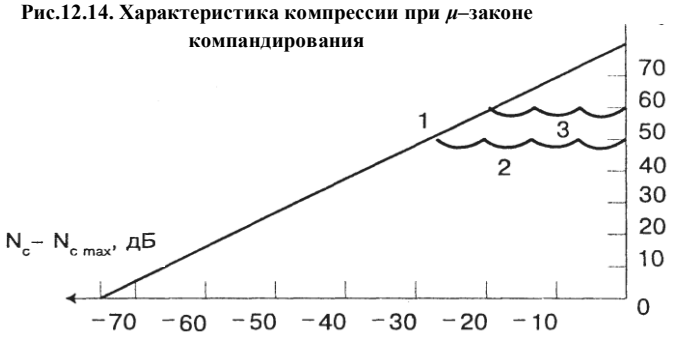


Рис.12.16. Зависимость сигнал/шум квантования от уровня сигнала на входе компандера

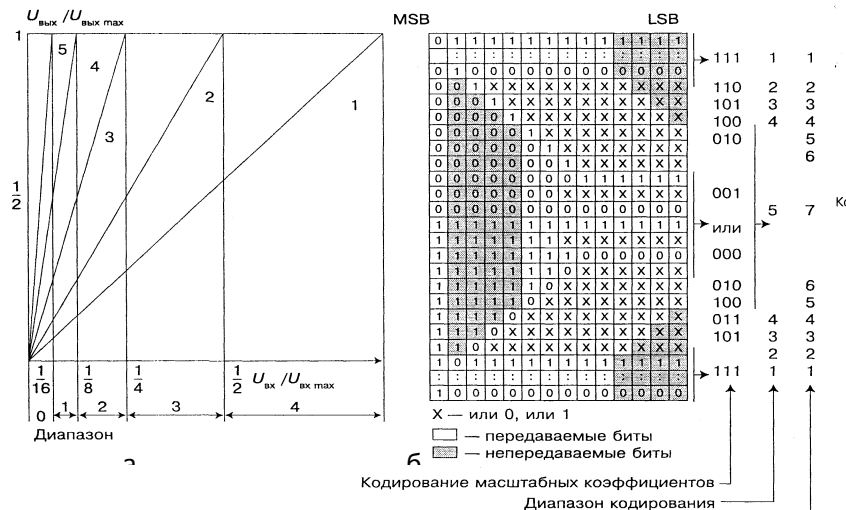


Рис.12.17. Почти мгновенное компандирование: а – шкалы квантования; б – процедура преобразования 14/10

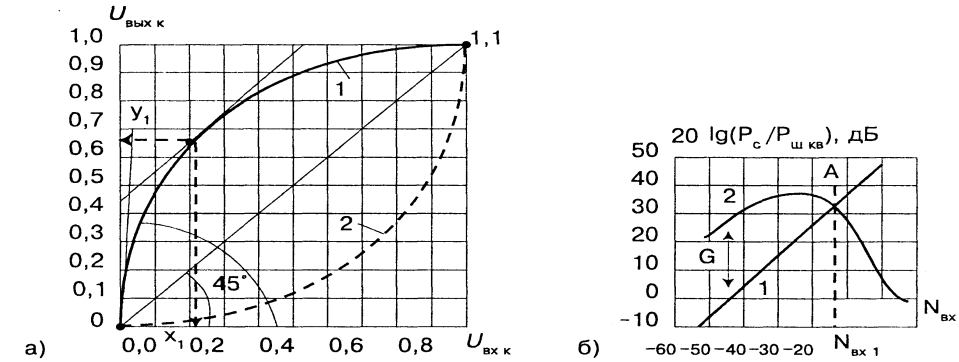
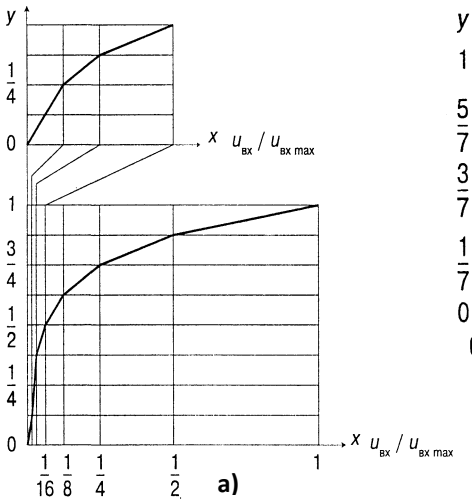


Рис.12.13. Нормализованные амплитудные характеристики сжимателя и расширителя а) 1 – амплитудная характеристика сжимателя; 2) амплитудная характеристика расширителя; б) ОСШ квантования в функции от уровня сигнала на входе компандерной системы: 1 – без использования компандера, *2* — с использованием компандера при 128 уровнях квантования.



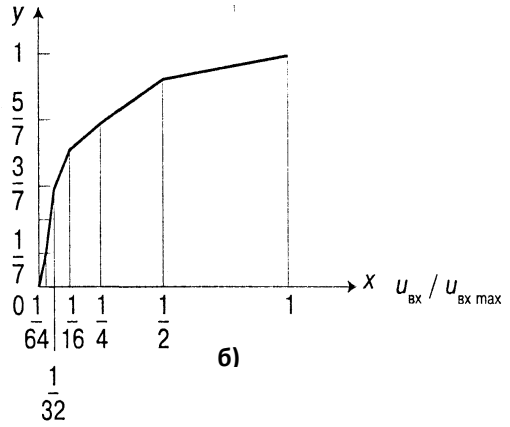


Рис.12.15. Кусочно-линейная аппроксимация характеристик компрессии: *а* – при компрессии по μ-закону с 11-ю аппроксимирующими сегментами; *б* – при компрессии по А-закону с 11-ю аппроксимирующими сегментами (части характеристик, находящиеся в третьем квадранте, не показаны)

Таблица 8.2. Кусочно-линейное компандирование

Уровень входного сигнала	Номер сегмента	Шаг квантования
0 … 7	0	Δ
8 … 15	1	Δ
16 … 31	2	2Δ
32 … 63	3	4Δ
64 … 127	4	8Δ
128 … 255	5	16Δ
256 … 511	6	32Δ
512 … 1023	7	64Δ

Рис.12.18. Метод преобразования 16-битовых кодовых слов в 14-битовые (16/14) с плавающей запятой: *а* – кодирование масштабных коэффициентов в зависимости от уровня сигнала; *б* – схема кодирования отсчетов ЗС; *в* – формат передачи по каналу

ЛЕКЦІЯ №12 СКОРОЧЕННЯ НАДЛИШКОВОСТІ МОВНИХ СИГНАЛІВ

ЛІТЕРАТУРА:

1. Брагин А.С. Технологиивещательных служб. Часть 1. Технологии звукового радиовещания. –К.: НТУУ «КПИ», 2006.
2. Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов./Под ред. Ю. А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком., Радио и связь, 2007. – 872 с.

РОЗДАТНИЙ МАТЕРІАЛ: див. ДОДАТОК И

1. Методи кодування джерел звукових сигналів

Відомо, що людина здатна приймати величезні потоки інформації своїми органами чуття. Пропускна здатність слухового апарату людини оцінюється цифрами 100 ... 120 кбіт/с. Але свідомо він здатний обробляти лише близько 100 біт/с інформації. Це означає (у згаданому сенсі) властиву звуковим сигналам надмірність.

Надмірність – це характеристика мовного сигналу, яка не піддається безпосередньому виміру. Її наявність виявляється за непрямими ознаками, як суб'єктивна, психофізична реакція людини. Величина надмірності є функцією часу і визначається характером звукових програм. Внаслідок цього способи досить повного обліку надмірності сигналів звукового мовлення повинні передбачати динамічний аналіз реального сигналу, що дозволяє оцінити її надмірність на короткому часовому інтервалі.

На рис.12.1 представлені узагальнені відомості про компактне подання звукових сигналів. Дамо до нього комментар.

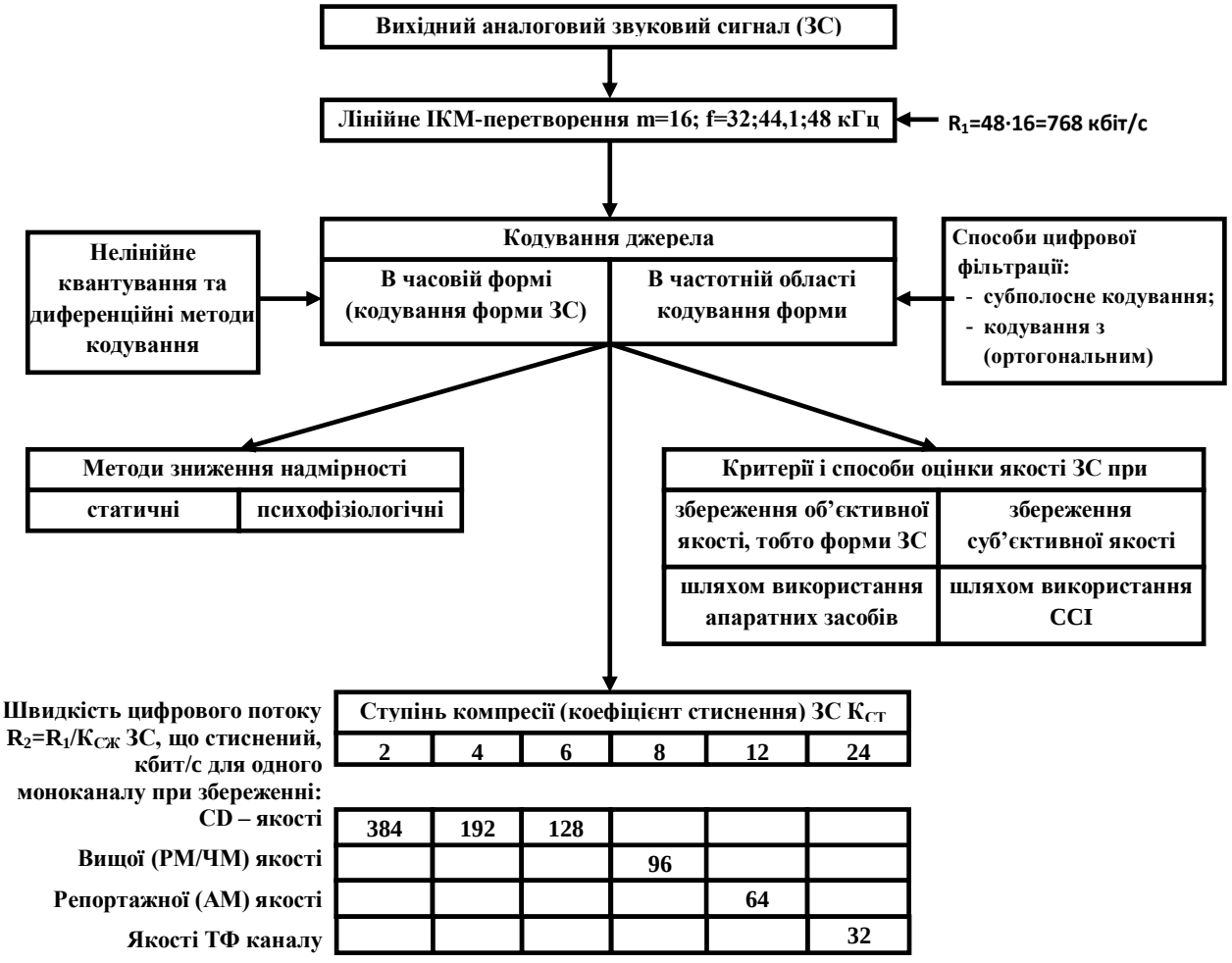
У системах зв'язку та мовлення природна надмірність джерел повідомлень є ресурсом, який традиційно використовується для зменшення цифрової швидкості передачі. Для зниження швидкості звичайно здійснюється перехід від початкового представлення звукового сигналу, отриманого в результаті первинного ІКМ-перетворення, до іншого подання (кодування), що характеризується меншою надмірністю.

Якщо цей перехід здійснюється в часовій області, тобто кодуванню піддаються часові параметри звукового сигналу, то операція називається ***кодуванням форми сигналу***.

Прикладами кодування форми сигналу являються розглянуті вище різноманітні компандерні системи (наприклад, різновиди ІКМ і диференційної ІКМ (ДІКМ), майже миттєве компандування), що використовують ефект маскування шумів сигналом великого рівня. Вони підтримують відношення сигнал/шум квантування, що забезпечує маскування шуму квантування. Так кодування з використанням ДІКМ дозволяє враховувати статистичні властивості звукового сигналу, пов’язані з кореляцією між відліками. При цьому кодуванню підлягають не самі відліки сигналу, а різниці між поточними

відліками та їх передбаченими значеннями на основі використання попередніх відліків.

У виродженому випадку передбачення здійснюється по одному попередньому відліку. Якщо різницевий сигнал кодується одним двійковим розрядом, то ДІКМ вироджується в дельта – модуляцію (ДМ). В реалізаційному плані ДМ являється найбільш простим методом кодування, оскільки не потребує дорогих багаторозрядних АЦП і ЦАП. Але **для збереження високої якості при ДМ доводиться встановлювати частоту дискретизації значно вищою номінального значення, яке приймається в ІКМ**.



Швидкість цифрового потоку $R_2=R_1/K_{СЖ}$ ЗС, що стиснений, кбит/с для одного моноканалу при збереженні:	Ступінь компресії (коефіцієнт стиснення) ЗС $K_{СТ}$					
	2	4	6	8	12	24
CD – якості	384	192	128			
Вищої (РМ/ЧМ) якості				96		
Репортажної (АМ) якості					64	
Якості ТФ каналу						32

Рис.12.1. Загальні відомості про компактне подання звукового сигналу

Стиснення із збереженням об'єктивної якості можливе лише при кодуванні форми сигналу, характеризується коефіцієнтом стиснення порядку 2…5 (в залежності від жанру мовленнєвого сигналу). *Вважається, що спосіб кодування форми сигналу з метою зниження швидкості цифрового потоку до теперішнього часу практично себе вичерпав.* Після такого перетворення швидкість цифрового потоку залишається достатньо високою через не повне скорочення надлишковості. Так, звичайна 16-розрядна (або 16/14-розрядна) ІКМ створює широкосмуговий (майже білий) шум

квантування, спектральне представлення якого суттєво відрізняється від частотно-залежної чутливості вуха.

2. Скорочення статистичної надлишковості

Скорочення статистичної надлишковості базується на врахуванні властивостей самих сигналів. Вона зумовлена наявністю кореляційного зв'язку між сусідніми відліками звукового сигналу при його дискретизації. Використовуючи статистичні властивості сигналу (динамічний діапазон, спектральну щільність потужності і смугу частот, розподіл миттєвих значень, функцію кореляції сигналу та ін.) вдається зменшити швидкість цифрового потоку, *не змінюючи форму сигналу* і не погіршуючи *об'єктивні* параметри якості.

Для зменшення статистичної надлишковості застосовуються досить складні алгоритми цифрової обробки (тут не розглядаються).

Згадана *ліквідація статистичної надлишковості звукових сигналів також не призводить до суттєвого зниження швидкості цифрового потоку*. Навіть при використанні достатньо складних алгоритмів обробки ліквідація статистичної надлишковості дозволяє зменшити необхідну пропускну здатність каналу передачі на 15…20% у порівнянні з початковою величиною, що не можна визнати суттєвим досягненням.

Однак і після ліквідації статистичної надлишковості швидкість цифрового потоку при передачі широкосмугових звукових сигналів і можливості людини з їх осмисленого слухового сприйняття відрізняються *на декілька порядків. Це свідчить про наявні значні резерви зменшення психофізіологічної надлишковості первинних цифрових звукових сигналів.*

Найбільш перспективними при скороченні надлишковості виявились методи, що враховують властивості слуху, які характеризуються маскуванням.

3. Скорочення психофізіологічної надлишковості

Скорочення ***психофізіологічної*** (іноді її називають психоакустичною) надлишковості сигналів базується на врахуванні особливостей слухового сприйняття людини. До них відносяться частотне і часове маскування, інерційність сприйняття, поділ на «критичні смуги слуху» (ряд виділених слуховим аналізатором людини специфічних «піддіапазонів» частотного спектру, в яких відбувається частотне маскування одного сигналу іншим), низька чутливість слуху до зниження точності градацій амплітуди і фази спектральних компонентів. *Психофізіологічні методи скорочення надлишковості забезпечують найбільше зниження швидкості цифрового потоку (до величини, що відповідає недопустимому погіршенню якості мовленнєвого сигналу аж до відчутного на слух).*

Примітка. Помітимо, що для оцінки якості роботи кодера можливе використання двох критеріїв – збереження *об'єктивної* (визначення спотворень апаратними засобами) і

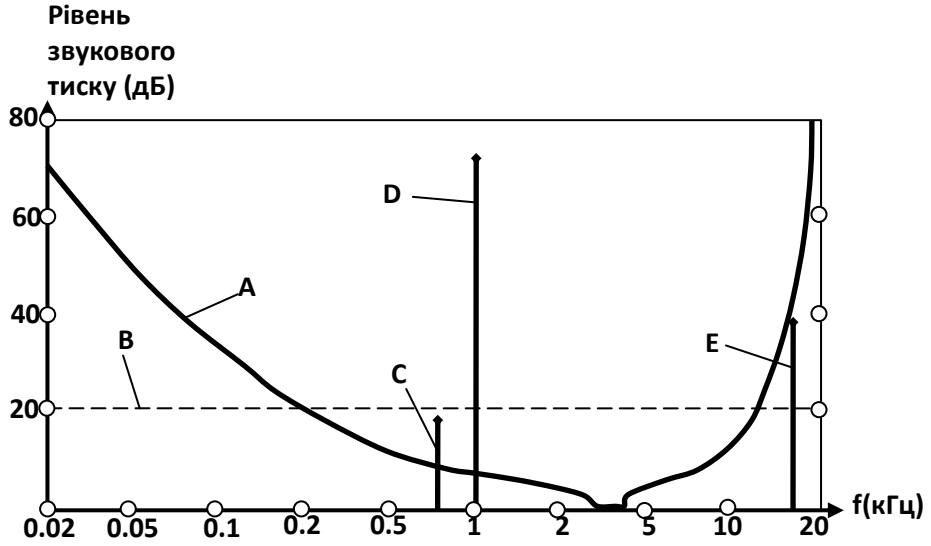
суб'єктивної якості (за помітністю спотворень при проведенні суб'єктивно статистичних випробувань - ССВ).

Другий критерій є менш жорстким, але він не завжди достатній. Саме це може породжувати відгуки вимогливих експертів про звучання CD - системи типу «тембрально все збалансовано, але звучить плоско і однаково, крізь мутну і незрозумілу суміш… .Від пружного рельєфного звуку контрабасу лишаються лише пощипування струн, саме ж звучання, розмите і невиразне, постає у вигляді аморфного гулу. Звучання фортепіано стає якимось ватним, неживим. Виконавча манера безпардонно нівелюється: розчути нюанси гри музиканта в схематично зображеному звуці практично неможливо. Гра мідних духових набуває «ресторанний» відтінок, ніби через дешевий мікрофон: звук спрощений, скомпресований його грубою мембраною».

Величина порогу чутності не постійна. Вона узгоджується із звуковими подіями і залежить від частоти та від рівня інших сигналів, на фоні яких сприймається даний звук. Наприклад, голосний звук може зробити нечутним тихе звучання. Це явище і називається маскуванням.

Основна ідея ліквідації психофізіологічної надлишковості може бути проілюстрована за допомогою рис.12.1а, де показані приклади сигналів різної частоти та ефективності.

Рівень сигналу **С** вище абсолютного порогу чутності та його можна було би почути, якби не шуми (лінія **В**), рівень яких вище рівня сигналу **С**; кодувати і передавати такий сигнал немає сенсу. Рівень сигналу **D** (1 кГц) вище рівня шумів і рівня абсолютного порогу чутності (лінія **А**); цей сигнал кодується та передається. Рівень сигналу **Е** вище рівня шумів, але нижче абсолютного порогу чутності; кодувати та передавати його також безглуздо. Так, в межах кожної з 24 критичних смуг слуху, властивих слуховому аналізатору в діапазоні частот 20 … 20000 Гц, найбільша по абсолютній величині спектральна складова маскує поряд розміщені компоненти спектру, якщо її рівень перевищує деяке порогове значення.



А – абсолютна границя чутності

В – рівень звукового тиску шуму

Рис. 12.1а. Приклади сигналів (С, D, Е) різної інтенсивності

Якщо відомо, які долі (частини) звукового сигналу сприймаються вухом, а які не сприймаються внаслідок явища маскування, то потрібно вичленити і потім передати по каналу зв'язку лише ті частини сигналу, які вухо здатне сприйняти, а нечутні долі (відрізки сигналу) можна відкинути (і не передавати по каналу мовлення).

Окрім того, сигнали можна квантувати з можливо меншим розрішеннґм (більшим кроком) так, щоби шуми квантування (змінюючись за величиною зі зміною рівня самого сигналу) ще не ставали би чутними.

Хоча вплив маскування спостерігається в частотній області, тривалість його в часі невелика (не більше ***15*** мс). Тому скорочення психофізіологічної надлишковості слід здійснювати не в частотній області, а в частотно-часовій не рідше ніж один раз за 15 мс. Тоді узагальнена структурна схема кодера може бути представлена у вигляді рис. 12.2.

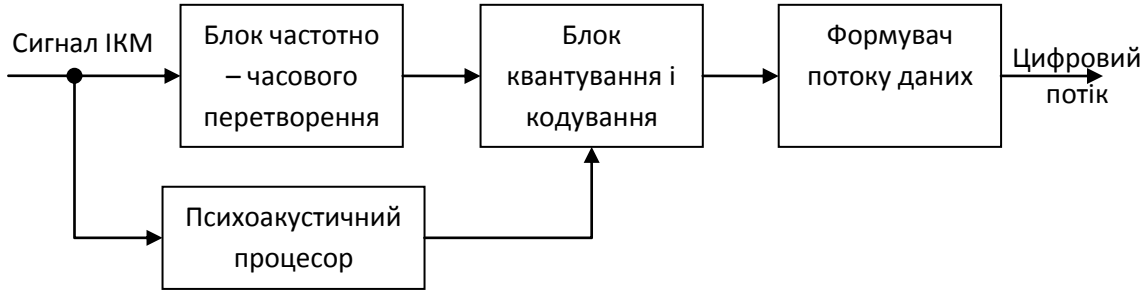


Рис. 12.2 Узагальнена структурна схема психофізіологічного кодера

Первинна операція (розклад деякої множини вхідних відліків на частотні складові, тобто визначення спектру сигналу) здійснюється в блоці частотно-часового перетворення. Разом з відповідним йому блоком частотно-часового перетворення декодера на приймальній стороні він утворює систему аналізу-синтезу звукового сигналу. Цей блок часто називають ***блоком фільтрів*** (банком фільтрів, filter bank), ***субсмуговим кодером*** (subband coders) або ***трансформуючим кодером*** (transform coder).

В субсмугових кодерах розклад сигналу зазвичай проводиться на невелике число частотних смужок (наприклад, 8) і одночасно опрацьовуються сусідні в часі відліки сигналів. В трансформуючих кодерах сигнал ділиться на відносно велике число частотних смужок (наприклад, 32, що перевищує число банків у звуковому діапазоні) і одночасно оброблюються сусідні складові. З математичної точки зору всі банки фільтрів мають однакову структуру, оскільки виконують одну й ту ж операцію – розклад смуги частот сигналу на деяке число смужок. Тому будь-яку назву можна вважати правомірною.

Отже, спектр сигналу розділяється на смужки частот (тобто початковий сигнал перетворюється у багатоканальний смуговий). В кожному смуговому каналі (субканалі) здійснюється зменшення частоти дискретизації до величини, рівної подвоєній смузі пропускання відповідного фільтру (за теоремою Котельникова). Кодуванню піддаються послідовності відліків смугових сигналів.

Психоакустичний процесор аналізує або обвідну вхідного сигналу, або обвідну його спектру, сформованого блоком часово-частотного перетворення. Із урахуванням закладеної в його програму психоакустичної моделі людського слуху, він обчислює межу маскування вхідного сигналу і визначає кількість розрядів, необхідну для кодування значень його спектральних складових. Чим більш точно визначена межа маскування, тим більш висока якість звучання (при суб'єктивній оцінці) може бути досягнута при відносно низькій швидкості потоку оцифрованого звуку.

Примітка. Психоакустичний процесор часто називають «психоакустичною моделлю» (Psychoacoustic Model), перцептуальною моделлю (Perceptual Model) або перцептуальною системою кодування (Perceptual Encoding System). Англійське слово «perception» буквально означає «сприйняття», «відчутності» чого-небудь.

Різні кодери можуть використовувати різні психоакустичні моделі. Визнати найкращою яку-небудь з них поки не є можливим через обмеженість знань про природу маскування одних звуків іншими. Найбільш відомі три психоакустичні моделі:

- NMR (Noise to Mask Ratio)
- PAQM (Perceptual Audio Quality Measure)
- PERCEVAL (PERCeptual EVALuation).

Призначення *блоку квантування і кодування* зрозуміло з назви. Операції в цьому блоці реалізуються таким чином, щоб шум квантування не перевищував межі маскування. *Межа маскування вираховується психоакустичним процесором, виходячи з величини обвідної спектра і закладеної в нього психоакустичної моделі людського слуху.* В залежності від закладеного алгоритму процедура кодування може бути найрізноманітнішою (від простого блокового кодування до складного аналізу різноманітних варіантів квантування з використанням додаткових елементів компресії, що забезпечують відсутність шумів). Саме в цьому блоці виконується скорочення об'єму переданих даних. Найчастіше використовуються два алгоритми функціонування блоку.

Перший. Алгоритм поблокового компандування або алгоритм з плаваючою комою. Масив даних, обмежений або у часовій області (ряд послідовних відліків сигналу), або ж в частотній області (набір спектральних складових у виділеній смужці частот) нормалізується по максимуму абсолютної величини. Нормалізуючий коефіцієнт в даному випадку називається ***коефіцієнтом масштабування*** (або експонентою). Потім всі величини, що входять у виділений масив даних (блок), квантуються з одним і тим же кроком квантування, який визначається виходячи із загальної кількості бітів, виділених для даного блоку психоакустичним процесором. Ним же задається і алгоритм кодування. Алгоритм розподілу бітів не відрізняється високою точністю і складністю в реалізації.

Другий. Алгоритм, що використовує квантування з масштабуванням, залежним від рівня шумів в кожній смужці частот і кодуванням за методом Хафмана. Цей алгоритм не передбачає точного числа бітів на увесь блок. Замість цього оцінюється енергія шуму, існуючого в кожній розглядуваній смужці, і на її основі розраховується межа маскування в цій смужці і коефіцієнт масштабування. Коефіцієнти масштабування вибираються так, щоб мінімізувався (наскільки можливо) присутній в даній смужці шум квантування

(шляхом зміни кроку квантування для всіх величин всередині смужки з цим коефіцієнтом масштабування), і не являються результатом виконання процедури нормалізації. Квантовані величини кодуються за допомогою кодів Хафмана. Увесь процес знаходиться під постійним контролем однієї або декількох схем ітерації.

Урахування перелічених властивостей слуху і пов'язаних з ним особливостей сприйняття дозволяє суттєво скоротити загальне число бітів, необхідне для цифрового представлення звукових сигналів. При цьому скорочується кількість інформації, яку необхідно передати чи запам'ятати з допустимими втратами якості звучання.

Після ліквідації психофізіологічної надлишковості точне відновлення форми часової функції звукового сигналу при декодуванні виявляється вже неможливим. Втрачена інформація при відтворенні не відновлюється.

Одночасна ліквідація статистичної і психофізіологічної надлишковості дозволяє максимально зменшити швидкість цифрового потоку при кодуванні звукового сигналу до величини, при якій шуми, завади і спотворення лишаються ще непомітними на слух навіть для висококваліфікованих експертів.

Примітка. Якщо компресія цифрових аудіоданих вже використовувалась при доставці програми мовлення по каналу, то (при відсутності інформації про це) її повторне застосування може привести до появи суттєвих спотворень, хоча початковий сигнал (до повторного прослуховування) здається цілком якісним. Тому важливо знати «історію» цифрового сигналу, мати відомості про застосовані раніше способи кодування. *Окрім того, можуть суттєво різнитися результати об'єктивного і суб'єктивного способів контролю якості:* традиційні методи оцінки якості для кодеків з компресією цифрових аудіоданих виявляються непридатними.

Для експертних оцінок якості кодеків з компресією цифрових аудіоданих використовуються відривки звукових сигналів з компакт-диску EBU-SQAM, Cat #422 204-2. Він спеціально створений групою MPEG з цією метою. При об'єктивній же оцінці якості цих пристроїв слід керуватися Рекомендацією MCE-P «Method for objective Measurement of Perceived Audio Quality» (Document 10-4/19-E, 19 March 1998).

Найбільш відомі алгоритми компресії (методи кодування) цифрових аудіоданих представлені в табл.12.3

Їх історія така.

Роботи з аналізу якості і оцінки ефективності алгоритмів компресії аудіоданих з метою їх наступної стандартизації розпочато в 1988 р. після утворення міжнародної експертної групи MPEG (Moving Pictures Experts Group).

У 1992 р. з'явився перший стандарт MPEG-1 ISO/IEC 11172-3 (тут і надалі цифра 3 після номеру стандарту відноситься до тієї його частини, де мова йде про кодування звукових сигналів).

У радіомовленні отримали розповсюдження ще декілька стандартів (MPEG-2 ISO/IEC 13818-3; MPEG-2 ISO/IEC 13818-7; MPEG-4 ISO/IEC 14496-3). В якості альтернативи стандартам MPEG в США розроблено стандарт Dolby AC-3 (A/52). Дещо пізніше сформувалися платформи цифрових технологій для радіомовлення і телебачення (DAB, DRM – з використанням європейських

стандартів, і ASTC з американським стандартом Dolby AC-3). Вони відрізняються не лише обраним алгоритмом стиснення цифрових даних, але й процедурою канального (завадостійкого) кодування та видом цифрової маніпуляції в радіопередавачах мовлення.

Найбільш яскравими представниками методів підсмугового кодування є метод MUSICAM (Masking Pattern Universal Subband Integrated Coding And Multiplexing), що використовує гребінку із 32 смугових фільтрів, і метод SB-ADPCM, що використовує гребінку із 8 фільтрів і кодування сигналів методом адаптивної ДІКМ.

Для синтезу початкового сигналу на приймальному кінці проводиться підвищення частоти дискретизації смугових сигналів до початкової величини та їх сумування. Окрім того, для забезпечення правильного декодування скомпресованих сигналів, окрім кодових слів відліків звукового сигналу (основна аудіоінформація), до декодера передається визначена додаткова (службова) інформація.

Після кодування цифрові потоки основної та додаткової інформації форматуються. При цьому найбільш важлива частина цифрових даних піддається завадостійкому кодуванню.

Більш детально опис компресії аудіоданих (в стандарті MUSICAM) представлено нижче.

Таблиця. 12.1. Види компресії аудіоданих

Найменування алгоритму компресії аудіоданих	Метод компресії	Частота дискети-зації кГц	Число каналів передачі	Швидкість передачі, кбіт/с на канал	Величина компресії	Області застосування
ASPEC	Кодування з перетворенням	32; 44,1; 48	1; 2	64 … 192	1:6	IDSN
ATRAC	Субсму-гове кодування з перетво-ренням	44,1	2	256	1:5	MiniDisk
MASCAM	Субсму-гове кодування	48	1; 2	128 … 256	1:4	DAB
MUSICAM	Субсму-гове кодування	48	1; 2	128 … 256	1:4	DAB

MPEG-1 (Layer 1 & 2)	Субсмугове кодування (MUSICAM)	32; 44,1; 48 (Layer 1 лише 48)	1; 2	Layer 1: 32 … 448 Layer 2: 32 … 384	1:4 (Layer 1) 1:6 (Layer 2)	DAB (Layer 2: 128 … 258 кбіт/с) DBS (Layer 2: 224 кбіт/с) DCC (Layer 1: 384 кбіт/с)
MPEG-1 (Layer 3)	Субсмугове кодування з перетворенням	32; 44,1; 48	1; 2	32 … 320	1:9	Internet – мовлення
MPEG-2	Субсмугове кодування з перетворенням	16; 22 … ; 48	1 … 5.1	32 … 384	>1:9	Багатоканальне стереофонічне мовлення
MPEG-2 AAC	Субсмугове кодування з перетворенням	16; 22 … ; 48	1 … 5.1	16 … 384	1:15	Багатоканальне стереофонічне мовлення
MPEG-4	Субсмугове кодування з перетворенням/ параметричне кодування	16; 22 … ; 48	1 … 5.1	2 … 64	-	Мультимедіа додатків
Dolby AC-3	Кодування з перетворенням	44,1	1 … 5.1	32 … 384	1:13	Кінематограф, HDTV, супутникове мовлення
Гібридне	Субсмугове кодування з перетворенням/ параметри	44,1	1; 2	32 … 64	1:(15 … 20)	Радіомовлення, зберігання інформації

	чне кодування					

Стандарт MPEG-1 ISO/IEC 11172-3 рекомендуется для кодирования высококачественных моно- и двухканальных стереофонических сигналов, он предусматривает использование трех значений частот дискретизации звуковых сигналов равных 32, 44,1 и 48 кГц.

Стандарт MPEG-2 ISO/IEC 13818-3 — это обратно совместимая с MPEG-1 версия метода кодирования звуковых сигналов различных форматов: 1/0, 2/0, 3/1, 3/2, 5.1, сигналов систем Dolby (Dolby Stereo, Dolby Surround и Dolby Pro Logic и т.п.). Она использует (дополнительно к уже имеющимся значениям в MPEG-1) частоты дискретизации, равные 16, 22,05 и 24 кГц.

Стандарт MPEG-2 ISO/IEC 13818-7 AAC предназначен для высококачественного (indistinguishable quality) в соответствии с требованиями EBU кодирования звуковых сигналов в полной полосе частот (до 20 кГц) при скоростях передачи около 64 кбит/с.

Стандарт MPEG-4 ISO/IEC 14496-3 ориентирован на мультимедиа приложения. Он спроектирован так, чтобы расширить возможности между мультимедиа терминалами мобильного доступа низкой сложности до высококачественных звуковых систем. Он использует базовые идеи и алгоритмы кодирования, уже определенные в стандарте MPEG-2 ISO/IEC 13818-7 AAC, а также новые идеи, основанные на параметрическом представлении звуковых сигналов.

В стандартах MPEG предусмотрено несколько уровней (слоев) компрессии цифровых данных: Layer 1, Layer 2 и Layer 3.

Layer 1 (слой 1) рекомендуется для применения в профессиональной области, в системах записи-перезаписи с высоким студийным качеством с достаточной емкостью памяти Он характеризуется небольшой сложностью и не высокой степенью редукции аудиоданных. Основные параметры: скорость цифрового потока 192 256 кбит/с, коэффициент компрессии около 4, задержка сигнала при обработке около 20 мс.

Layer 2 (слой 2) — потребительская область применения, высококачественное радиовещание, ему соответствует средняя сложность и средняя степень компрессии цифровых аудиоданных Основные параметры, рекомендуемая скорость цифрового потока 128 кбит/с при кодировании звукового сигнала с полосой частот равной 40 15 кГц, коэффициент компрессии 6, задержка сигнала при обработке 40 50 мс

Layer 3 (слой 3) рекомендуется для передачи звуковых сигналов по сети ISDN в профессиональной области со средним качеством, Интернет-вещания, отличается высокой сложностью и характеризуется следующими параметрами: скорость цифрового потока 64 кбит/с при полосе звукового сигнала 40...15 кГц, время задержки при его обработке более 50 мс.

4. Стандарт стиснення мовних сигналів MPEG-1

Общие сведения. Первичный цифровой сигнал ($f_д$ = 48 кГц, ΔA = 16 бит/отсчет, v = 768 кбит/с) разделяется банком цифровых фильтров на 32 субполосные составляющие (рис. 12.42 и 12.43). Аудиофрейм образует выборка, состоящая из 384 (Layer 1) или из 1152 (Layer 2 и Layer 3) отсчетов ЗС. Время передачи аудиофрейма составляет 8 мс (Layer 1) и 24 мс (Layer 2 и Layer 3). Банк фильтров имеет относительно малое время задержки ЗС при одновременной компенсации искажений, возникающих за счет интерференции в местах стыковки субполосных сигналов. Все 32 субполосы имеют постоянную ширину $\Delta F = f_д/(2n)$, равную 750 Гц, где $f_д$ — частота дискретизации ЗС; n — число субполос. После фильтрации отсчеты ЗС в каждой субполосе собираются в блоки. Кодированию могут подвергаться либо сами отсчеты ЗС (Layer 1 и Layer 2), либо коэффициенты МДКП (Layer 3). В первом случае (рис. 12.42) в каждой субполосе кодирования имеем

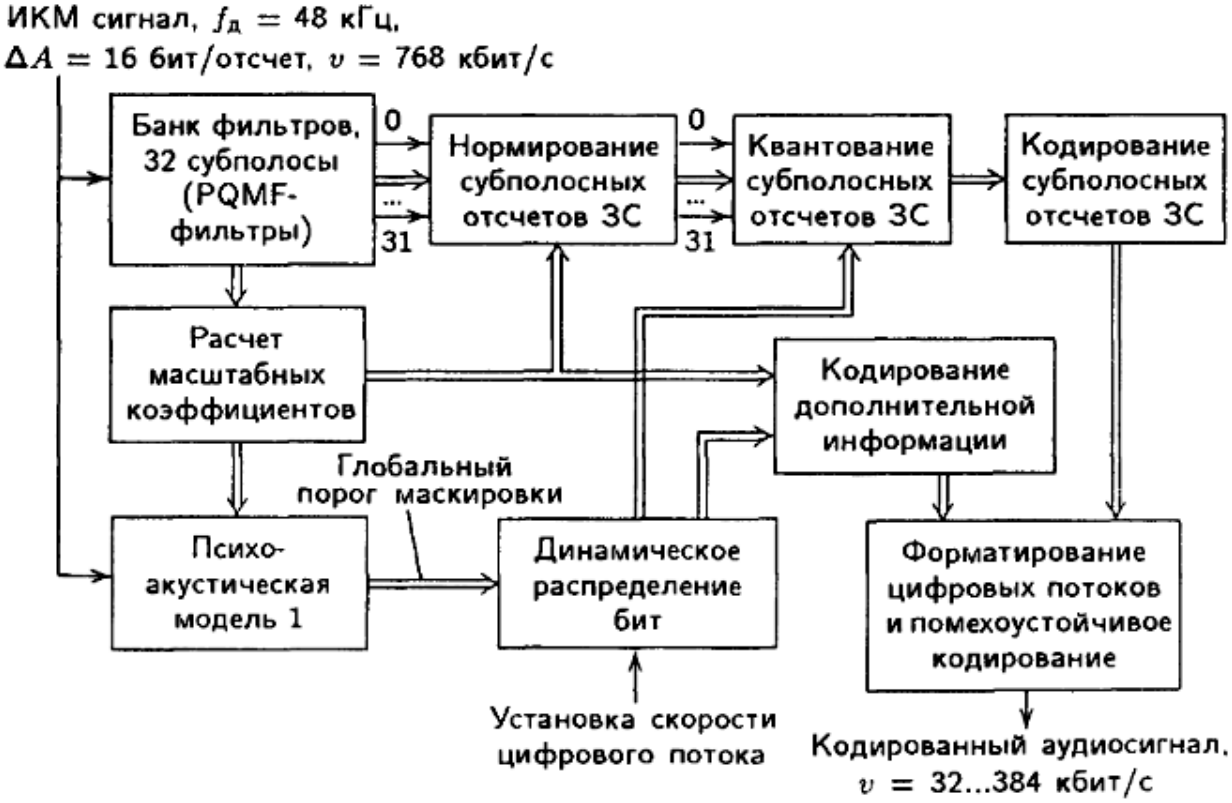


Рис. 12.42. Структурная схема кодера MPEG стандарта ISO/IEC 11172-3, Layer 1 и Layer 2

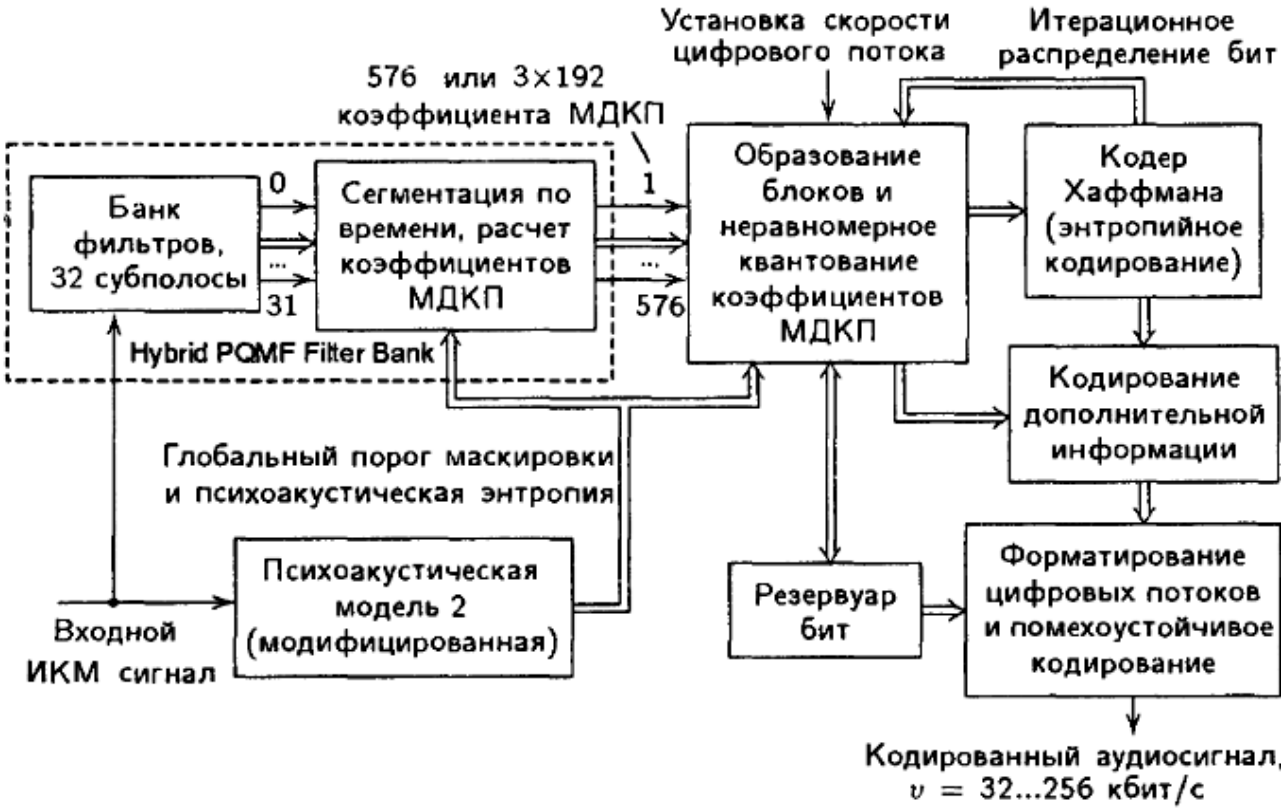


Рис. 12.43. Структурная схема кодера MPEG стандарта ISO/IEC 11172-3, Layer 3

по 384 : 32 = 12 (Layer 1) или по 1152 : 32 = 36 отсчетов ЗС (Layer 2), во втором случае (рис. 12.43) — по 18 коэффициентов МДКП. Заметим, что в Layer 1 и в Layer 2 используется банк полифазных квадратурных зеркальных фильтров PQMF (Polyphase Quadrature Mirror Filter); в отличие от этого в Layer 3 применен так называемый гибридный банк фильтров (Hybrid PQMF Filter Bank, рис. 12.44), который дополнительно содержит блок МДКП и частотный корректор (ЧК). В Layer 3 при помощи банка PQMF-фильтров 1152 отсчета ЗС двумя блоками по 576 отсчетов каждый прежде всего разделяются на 32 субполосных составляющих. На выходе каждого такого PQMF фильтра имеем соответственно 36 (18 + 18) отсчетов ЗС. При расфильтровке значение $f_д$ в каждом субполосном канале понижается в 32 раза. Далее в каждом таком субканале для группы отсчетов ЗС выполняется МДКП. При этом длина N ортогонального преобразования зависит от формы временно́й функции выборки ЗС. При отсутствии всплесков в сигнале выборки МДКП выполняется для всей группы из 36 отсчетов субполосного сигнала, а при наличии всплесков отдельно для трех групп, каждая из которых содержит уже по 12 отсчетов звукового сигнала, образуя три подблока.

При длинном преобразовании ($N = 36$) общее число коэффициентов МДКП во всех субполосах (субканалах) равно $18 \times 32 = 576$, при коротком преобразовании ($N = 12$) имеем соответственно по $6 \times 32 = 192$ коэффициента МДКП в каждом коротком блоке. Далее эти три коротких блока объединяются в гранулу, так что в обоих случаях общее число коэффициентов МДКП в выборке звукового сигнала равно $192 \times 3 = 576$

Для изменения длины N ортогонального преобразования исполь-

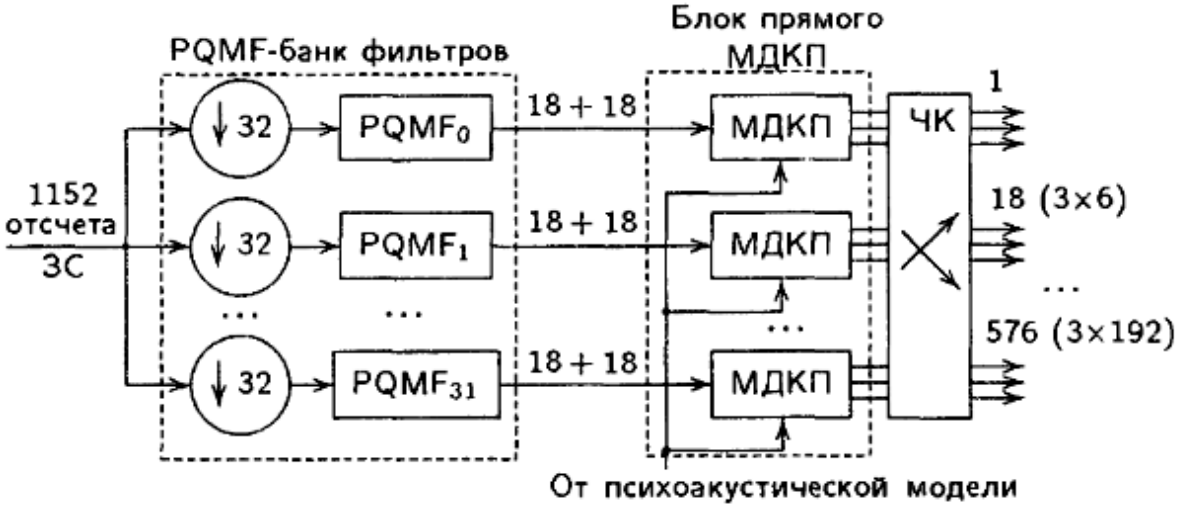


Рис. 12.44. Структурная схема гибридного банка фильтров кодера MPEG стандартов ISO/IEC 11172-3 или 13818-3, Layer 3

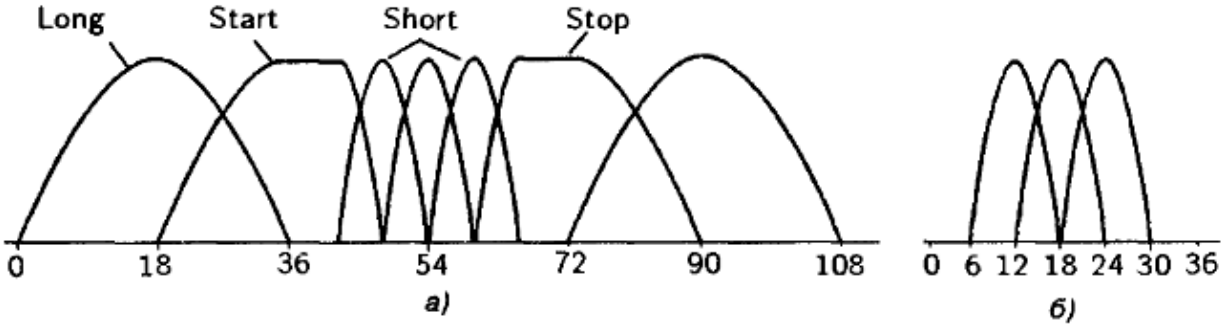


Рис. 12.45. Типы оконных функций, используемых в гибридном банке фильтров (*а*), и последовательность их переключения при наличии всплеска в сигнале выборки (*б*)

зуется набор оконных функций: синусное окно типа long для длинного преобразования, синусное окно short для короткого преобразования и два окна перехода start и stop, необходимые для уменьшения искажений, возникающих при переходе от длинных к коротким окнам и наоборот (рис. 12.45). Частотный корректор (ЧК, рис. 12.44) необходим для уменьшения искажений, возникающих вследствие добавления в банк PQMF фильтров (Layer 1 и Layer 2) процедуры ортогонального преобразования. Решение о выборе длины МДКП принимает психоакустическая модель кодера, вычисляя для сигнала каждого аудиофрейма

психоакустическую энтропию PE. Если PE превышает некоторое пороговое значение, то используется короткое преобразование ($N = 12$), в противном случае — длинное ($N = 36$).

Отсчеты ЗС или соответствующие им коэффициенты МДКП после банка фильтров масштабируются (нормируются), квантуются и затем кодируются.

Кодирование отсчетов ЗС в Layer 1 и Layer 2. *Кодирование масштабных коэффициентов.* В Layer 1 в каждом субполосном канале после фильтрации имеем по 12 отсчетов ЗС. При этом максимальное значение отсчета в субполосе является масштабным коэффициентом SCF (Scale Factor) выборки субполосного ЗС. Всего для Layer 1 имеем 32 масштабных коэффициента. В Layer 2 каждый блок из 36 отсчетов ЗС делится на три подблока, называемые гранулами. В каждой грануле, включающей 12 отсчетов ЗС, определяется максимальный отсчет, его значение является масштабным коэффициентом SCF гранулы. Всего субполос 32, поэтому для Layer 2 общее число SCF равно $3 \times 32 = 96$. Передаваемые декодеру значения SCF заданы в стандарте таблицей. Поэтому максимальный отсчет в грануле сравнивается с набором табличных значений SCF. Из множества последних выбирается ближайшее большее. Оно и принимается за SCF гранулы. Каждому табличному значению SCF соответствует свой индекс iscf, указанный в соответствующей таблице стандарта ISO/IEC 11172-3. Кодируется не само значение SCF, а соответствующий ему индекс iscf. Он представляет собой целое число, изменяющееся в пределах от 0 до 62. Индекс масштабного коэффициента iscf (0...62) кодируется 6-ю битами. Индексы SCF передаются только для тех субполос, для которых выделены биты на кодирование отсчетов. В Layer 1 для каждой субполосы передается лишь один масштабный коэффициент (либо ни одного, если отсчеты данной субполосы не кодируются и не передаются). В Layer 2 в зависимости от различий масштабных коэффициентов трех гранул для каждого субполосного сигнала может передаваться разное их число: либо одно максимальное, либо два, либо три значения, либо не одного, если отсчеты ЗС данной субполосы не кодируются. Для этой цели предварительно вычисляются разности $dscf_1$ и $dscf_2$ масштабных коэффициентов SCF_1, SCF_2, SCF_3 соответственно первой второй и третьей гранул субполосного сигнала: $dscf_1 = SCF_1 - SCF_2$; $dscf_2 = SCF_2 - SCF_3$.

Все множество возможных разностей $dscf_1$ и $dscf_2$ разделено на пять областей, называемых классами различий и обозначенных ниже соответственно цифрами 1, 2, 3, 4 и 5:

Класс различий	Разность пар масштабных коэффициентов
1	$dscf \leqslant -3$
2	$-3 < dscf < 0$
3	$dscf = 0$
4	$0 < dscf < +3$
5	$dscf \geqslant +3$

Классы различий определяют число и номера SCF для каждой субполосы, передаваемое декодеру. Информация о выбранных масштабных коэффициентах (Scalenfactors Selection Information, SCFSI) кодируется двумя битами для каждой субполосы. Расчет значений SCF и выбор их числа для передачи к декодеру выполняется в блоке расчета масштабных коэффициентов

Нормирование, квантование и кодирование отсчетов ЗС После того как масштабные коэффициенты SCF найдены, отсчеты субполосных сигналов нормируются Нормирующим множителем для группы отсчетов является соответствующий им масштабный коэффициент SCF Далее нормированные значения отсчетов ЗС квантуются и кодируются

Таблица 12.1

Число ступеней квантователя

Номер субполосы, n	Индекс квантователя							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0–2	3	7	15	31	63	127	255	511
3–10	3	5	7	9	15	31	63	127
11–22	3	5	7	9	31	65536	–	–
23–26	3	5	65535	–	–	–	–	–
Номер субполосы, n	Индекс квантователя							
	9	10	11	12	13	14	15	
0–2	1023	2047	4095	8191	16383	32767	65535	
3–10	255	511	1023	2047	4095	8191	65535	
11–22	–	–	–	–	–	–	–	
23–26	–	–	–	–	–	–	–	

В Layer 1 и Layer 2 используется равномерное квантование. Для каждой субполосы n число ступеней квантования или набор квантователей задается в стандарте для Layer 1 и Layer 2 таблицей. Например, табл. 12.1 соответствует Layer 2 и скоростям передачи, лежащих в пределах 56...384 кбит/с.

Для каждой скорости передачи (или группы скоростей) существует своя такая таблица. Значения $f_д$ и скорость передачи цифровых данных v определяют также и максимальный номер субполосы n, отсчеты ЗС которой еще кодируются и передаются на приемную сторону системы. Например, при $f_д = 48$ кГц и $v = 56...192$ кбит/с биты не выделяются для кодирования отсчетов ЗС с 27 по 31 субполосы; при $f_д = 32$ кГц и $v = 32$ кбит/с биты не выделяются в субполосы от 8 до 31 и т п.

Требуемый шаг квантования Δ_n отсчетов ЗС для каждой субполосы вычисляется из отношения сигнал-маска SMR(n), найденного по психоакустической модели, где SMR(n) — выраженное в дБ минимально возможное отношение энергии полезного сигнала к энергии шумов квантования в субполосе n, при котором этот шум еще маскируется полезным сигналом. Значение Δ_n меняется от одной субполосы кодирования к другой Однако для всех нормированных отсчетов ЗС внутри субполосы n шаг квантования Δ_n остается постоянным Число ступеней квантования при кодировании отсчетов ЗС в субполосах составляет 2^m, где m — число разрядов в кодовом слове отсчета. Оно изменяется дискретно в пределах от 3 до 65535, при этом соответственно число разрядов m в кодовом слове отсчета должно составлять от 2 до 16 Однако биты можно расходовать более экономно, используя процедуру группирования отсчетов Она применяется при кодировании отсчетов ЗС, прошедших квантователи с 3-мя 5-ю и 7-ю ступенями квантования При другом числе ступеней квантования процедура группирования не применяется При группировании каждые три следующих друг за другом квантованных субполосных отсчета ЗС кодируются одним кодовым словом При этом требуемое на кодирование каждого отсчета в такой группе число битов составляет 1,67 вместо 2 (при трех ступенях квантования), 2,33 вместо 3 (при 5 ступенях квантования) и 3,33 вместо 4 (при 9 ступенях квантования), т.е. для всего набора используемых квантователей изменяется в пределах 1,67; 2,33; 3; 3,33; 4; 5; 6; 7;...;16. Кодовые слова отсчетов, прошедших процедуру группирования, содержат соответственно 5, 7 и 10 битов.

Кодируется не число ступеней квантования, а соответствующий данному квантователю индекс, изменяющийся в пределах от 1 до 15. Если этот индекс принят равным 0, то это значит, что отсчеты ЗС данной субполосы не кодируются и не передаются. Подсчитаем число битов, необходимое для передачи информации о выбранном для каждой субполосы числе ступеней квантования. Заметим, что это поле данных называется информацией о распределении битов (bit allocation) по субполосам кодирования. Например, для субполосы с номером $n = 26$ может быть использован один из трех возможных квантователей с числом ступеней

квантования равным или 3, или 5, или 65535, имеющих соответственно индексы 1, 2 и 3. Для кодирования этих трех чисел достаточно кодовое слово из двух битов. Для семи квантователей, используемых при кодировании отсчетов в субполосах с 11 по 22, для передачи соответствующих им индексов кодовое слово должно иметь уже три бита, а для наборов квантователей групп субполос 0–2 и 3–10 — соответственно по четыре бита. В качестве примера подсчитаем число битов, необходимое для передачи информации о распределении битов по субполосам. Для каждой субполосы передается только индекс, соответствующий числу уровней квантования (указан в заголовке табл. 12 1), например, для субполосы 26 индексы равны 1, 2 и 3, и число уровней квантования соответственно равно 3 (для индекса 1), 5 (для индекса 2) и 65535 (для индекса 3). Тогда кодовые слова для субполос будут иметь следующее число битов:

для субполос (sb) 0–2 . . . . . 4 всего битов $4 \times 3 = 12$;
для субполос (sb) 3–10 . . . . . 4 всего битов $4 \times 8 = 32$;
для субполос (sb) 11–22 . . . . . 3 всего битов $3 \times 12 = 36$;
для субполос (sb) 23–26 . . . . . 2 всего битов $2 \times 4 = 8$

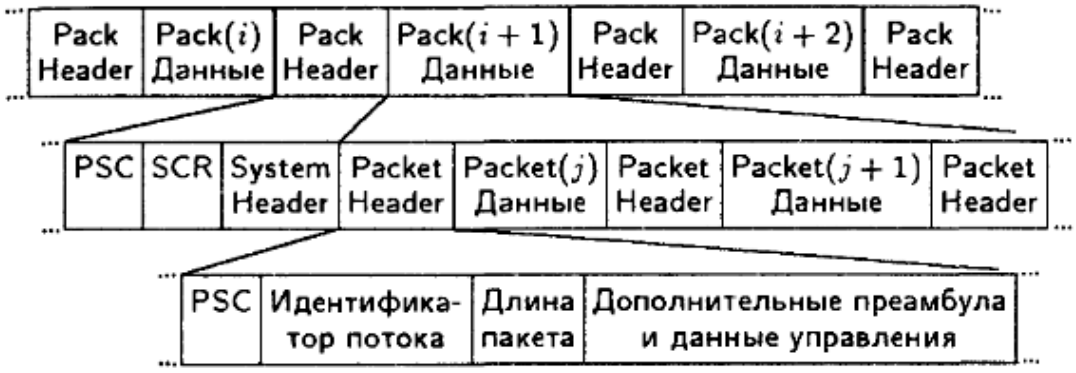
Таким образом, для кодирования информации о распределении битов по субполосам в аудиофрейме необходимо иметь в данном случае $12 + 32 + 36 + 8 = 88$ битов (Layer 2. скорость передачи 56...384 кбит/с). А вообще эта цифра может лежать в пределах от 26 (если кодируются сигналы 0–7 субполос, $f_д = 48$ или 44,1 кГц, $v \approx 32$ кбит/с) до 94 битов (когда кодируются сигналы 0–29 субполос, $f_д = 48$, 44,1 или 48 кГц, $v = 96..192$ кбит/с)

Процедура квантования отсчетов выполняется по формуле

$$S_{\text{кв},sb}(n) = AS_{sb}(n) + B.$$

где A и B — коэффициенты квантования которые выбираются по соответствующей таблице стандарта для каждого числа ступеней квантования $S_{sb}(n)$ — нормированное значение n-го субполосного отсчета

$S_{\text{кв},sb}$ — квантованное значение n-го субполосного отсчета. После кодирования выполняется процедура инвентирования разрядов в каждом кодовом слове отсчета.



а)

Header	CRC	BAL	SCF	Subband Samples	AD
12 бит синхрослово 20 бит информация о состоянии	16 бит	4 бита	6 бит →	Субполосные отсчеты, соответствующие 32 отсчетам ИКМ аудиосигнала	Дополнительные данные

б)

Header	CRC	BAL	SCFSI	SCF	Subband Samples	AD
12 бит синхрослово 20 бит информация о состоянии	16 бит	Нижние субполосы 4 бита Средние субполосы 3 бита Верхние субполосы 2 бита	2 бита 00 01 10 11	4 бита	$B(1)$ Блоки $B(12)$	Дополнительные данные

в)

Рис. 12.46. Структура цифрового сигнала при совместной передаче сигналов изображения и звука (*а*) и структура цифровых данных аудиофрейма в стандарте MPEG-1 ISO/IEC 11172-3: *б* — Layer 1; *в* — Layer 2

Структура цифровых данных аудиофрейма в Layer 1 и Layer 2. В MPEG-1 компрессированные сигналы изображения и звука передаются совместно в едином пакете (рис 12.46,*а*, верхняя часть, обозначены Pack(i), Pack($i+1$), Pack($i+2$), .) Перед каждым таким пакетом имеется системная преамбула (Header), где содержатся все системные параметры и вся необходимая общая служебная информация о системе Системная тактовая частота равна 90 кГц±4,5 Гц Преамбула повторяется перед началом каждого пакета Более подробно структуры преамбулы и собственно пакета данных представлены на рис. 12.46,*а* в средней части

Стандарт MPEG-1 предусматривает, что поток данных может содержать как аудио-, так и видеоданные, причем скорость передачи данных может составлять, например, для звуковой части (если компрессия ЗС выполняется кодером «Layer-2» при $f_д = 48$ кГц) 24 кбайт/с (192 кбит/с), а для передачи видеочасти — 150 кбайт/с Из соотношения этих скоростей передачи аудио- и видеоданных можно определить, с какой частостью должна передаваться в пакете данных аудио- и видео

информация. Вся дополнительная информация, необходимая для разделения и декодирования сигналов изображения и звука, должна быть приемнику известна (передана). Она и содержится в преамбуле пакета. Преамбула начинается стартовым кодом пакета (Pack Start Code), следующие 8 байт служат для передачи сигнала синхронизации и сигналов управления системой в целом (System Clock Reference, SRC), после этого передается системная преамбула данного пакета (System Header), которая содержит всю необходимую информацию управления для разделения следующих в пакете в переменной структуре аудио- и видеоданных. Без правильного приема и выделения информации управления процессы разделения потоков и их последующее декодирование будут невозможны. Длина преамбул составляет 12 байт, лишь самая первая преамбула имеет длину 29 байт.

Таким образом, затраты на передачу информации управления достаточно малы. Однако данный способ позволяет всей системе очень гибко адаптироваться к различным потокам информации. В пакетах видео- и аудиоданные сведены в отдельные субблоки (например, каждый длиной по 2 кбайт), несколько блоков (например, три) вновь образуют блок. Вся информация об этой структуре упаковки видео- и аудиоданных и местах расположения этих блоков в пакете содержится в преамбуле к пакету.

Теперь остановимся подробнее на структуре цифрового потока, относящегося только к передаче ЗС. Основной единицей цифрового потока в MPEG-1 ISO/IEC 11172-3 является аудиофрейм, включающий преамбулу (Header) и относящиеся к данному фрейму компрессированные данные (Frame(i) data), рис. 12.46,*б* и *в*

Структура цифровых данных внутри аудиофрейма жестко определена. Служебная информация, содержащаяся в преамбуле (32 бита), включает синхрослово 1111 1111 1111 (12 битов) и информацию о состоянии, относящуюся к структуре данных фрейма (20 битов). После преамбулы 16 битов отводятся для помехоустойчивого кодирования (CRC-код на рис. 12 46,*б* и *в*). Далее следуют собственно аудиоданные компрессированного звукового сигнала. Первой идет информация о распределении битов по субполосам (Bit Allocation, BAL) Она несет информацию о том, сколько битов используется для кодирования отсчетов в каждой из субполос В Layer 1 поле этих данных содержит кодовые слова длиной 4 бита, в Layer 2 длина кодовых слов в этом поле данных переменна, зависит от числа кодируемых субполосных сигналов, скорости цифрового потока, частоты дискретизации и меняется в пределах 2 4 битов Затем

в аудиофрейме располагается информация о передаваемых масштабных коэффициентах (SCFSI) для каждой из субполос, для ее передачи используется 2 бита После этого располагаются кодовые слова индексов масштабных коэффициентов (SCF) Для передачи одного масштабного коэффициента требуется 6 битов Наконец, во фрейме следуют кодовые слова субполосных нормированных отсчетов (Subband Samples)

При этом в Layer 2 они объединены в 12 блоков: B(1), B(2),...,B(j),..., B(12). Завершают аудиофрейм дополнительные данные (Ancillary Data, AD). Эта часть аудиофрейма может быть использована для передачи дополнительных данных.

Процедура распределения битов. Скорость передачи цифровых данных и длина аудиофрейма определяют общее число битов cb, имеющееся в нашем распоряжении на кодирование всей информации выборки ЗС. Отсюда следует исключить биты преамбулы (bhdr, 32 бита) и избыточные биты помехоустойчивого кодирования (bcrc, 16 битов CRC). Оставшиеся после этого биты могут быть использованы непосредственно для кодирования аудиоинформации, включающей поля данных: Bit Allocation, SCFSI, SCF и субполосных отсчетов ЗС (Subband Samples). Очевидно, что общее число битов, доступное в каждом аудиофрейме для кодирования информации о SCFSI, SCF и Subband Samples,

$$adb = cb - (bhdr + bcrc + bbal + banc),$$

где $bbal$ — число битов, требуемое для передачи информации о распределении битов по субполосам (Bit Allocation); $banc$ — биты дополнительных данных (Ancillary Data), не имеющие прямого отношения к информации кодируемой выборки отсчетов ЗС.

Процедура выделения битов при кодировании аудиоинформации из их доступного числа abd в Layer 1 и в Layer 2 носит итерационный характер. Процесс выделения битов начинается с субполосы, в которой рассчитанное по психоакустической модели требуемое значение SMR максимально. Для этой субполосы, например, с номером i сначала выделяется число битов, требуемое для передачи информации о распределении масштабных коэффициентов по субполосам (SCFSI, 2 бита) и для передачи этих коэффициентов (SCF; 6, 12 или 18 битов). После этого начинают выделяться биты для кодирования отсчетов ЗС данной субполосы i, начиная с минимально возможной длины кодового слова, определяемой наименьшим числом возможных ступеней квантования отсчетов ЗС в данной субполосе, с постепенным увеличением его длины, в соответствии с имеющимся в данной субполосе i набором квантователей. Процесс выделения битов в субполосу i продолжается до тех пор, пока фактическое отношение SMR,

в этой субполосе не станет больше минимального из множества этих значений, рассчитанных для остальных субполос психоакустической моделью. На этом процесс выделения битов в субполосу i прерывается, полученное для этой субполосы фактическое значение SMR, заменяет требуемое значение SMR, рассчитанное для нее ранее по психоакустической модели И биты начинают выделяться в новую субполосу, например полосу j, где теперь это отношение стало максимальным Этот новый цикл вновь начинается с выделения битов, необходимых для кодирования информации о распределении масштабных коэффициентов и об их значениях в субполосе j Затем начинают выделяться биты для кодирования субполосных отсчетов этой

новой субполосы по процедуре, описанной ранее. Процесс продолжается до тех пор, пока полученное фактическое значение SMR_j для этой субполосы не станет больше, чем в какой-либо другой из субполос, включая и субполосу i. Затем начинается процесс выделения битов в следующую субполосу, где это отношение максимально. Этот итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет исчерпано все имеющееся в нашем распоряжении доступное число битов.

Кодирование коэффициентов МДКП в Layer 3. *Общие сведения об алгоритме.* В Layer 3 (см. рис. 12.43) используется неравномерное квантование коэффициентов МДКП. Процедура неравномерного квантования выполняется с помощью двух итерационных циклов: внешнего и внутреннего. Во внутреннем цикле осуществляется собственно квантование коэффициентов МДКП в соответствии с требованиями к установленной скорости передачи, а внешний цикл приводит результаты квантования коэффициентов МДКП в соответствие с требованиями психоакустической модели. Для кодирования квантованных коэффициентов МДКП используются таблицы кодов Хаффмана. Это энтропийное кодирование, учитывающее статистические особенности звукового сигнала.

Перед квантованием и кодированием рассчитывается среднее число битов, приходящееся на одну гранулу при установленной скорости v передачи цифровых данных (рис 12.47) Оно определяется следующей формулой:

$$mean_bit = \frac{vN}{N_g f_д}, \text{ бит/гранулу},$$

где v — установленная скорость передачи цифровых данных, бит/с; $f_д$ — частота дискретизации входного сигнала; N — число отсчетов в выборке сигнала (в Layer 3 $N = 1152$); N_g — число гранул в аудиофрейме (в Layer 3 $N_g = 2$)

Так как преамбула аудиофрейма содержит 32 бита и для передачи дополнительной информации в Layer 3 отведено 17 байт (136 битов), то среднее доступное для кодирования число битов, приходящееся на гранулу, определяется следующим образом

$$B_{\text{сред}} = mean_bit - (32 + 136)/2.$$

После определения среднего доступного числа битов, которое можно использовать для кодирования коэффициентов МДКП, инициализируются переменные итерационных циклов и вычисляется величина

$$quantanf = system_const \quad \log_t(sfm),$$

где $system_const$ — системная константа, равная 210, а параметр sfm называемый спектральной неоднородностью сигнала выборки определяется как

$$sfm = \frac{\exp\left[\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1}\log(xr_i)^2\right]}{\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1}\log(xr_i)^2},$$

где n — суммарное число спектральных коэффициентов в грануле ($n = 576$), xr_i — i-й коэффициент МДКП в грануле (выборке). Значение параметра $system_const$ выбрано так, чтобы для всех сигналов первая итерация внутреннего цикла дала бы суммарное число битов меньшее, чем их доступное число для установленной скорости цифрового потока. Для того чтобы уменьшить затраты на время вычисления, целесообразно минимизировать число итераций путем адаптации величины $quantanf$ к скорости цифрового потока и статистике сигнала. Заметим, что значение $quantanf$ является постоянным для аудиофрейма.

И, наконец, перед входом во внутренний цикл предварительно проверяется условие: все ли коэффициенты

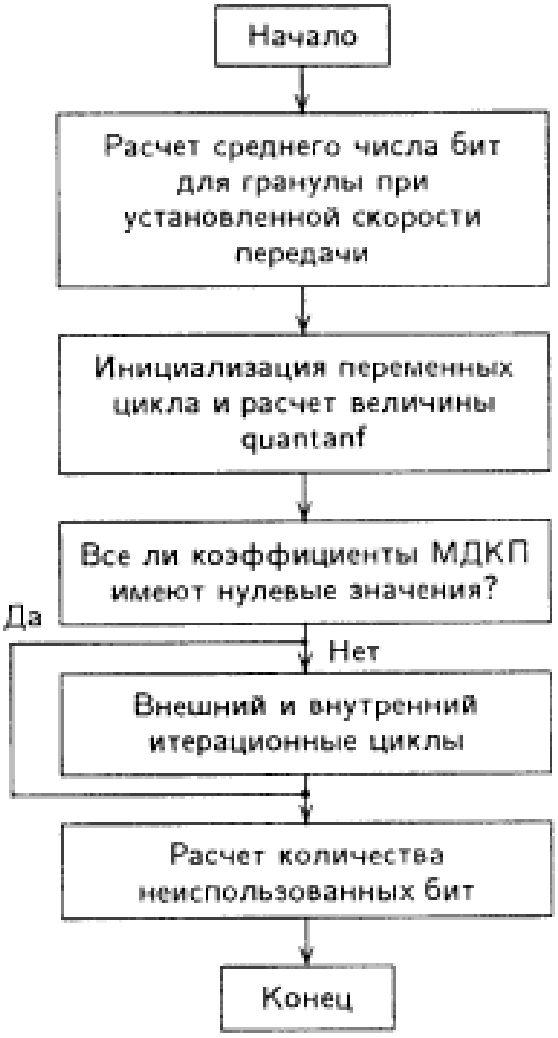


Рис. 12.47. Инициализационная часть итерационного процесса квантования и кодирования коэффициентов МДКП алгоритма MPEG-1 ISO/IEC 11172-3 Layer 3

МДКП имеют нулевые значения? Если не все, то выполняются внутренний и внешний итерационные циклы, в результате чего коэффициенты МДКП квантуются и кодируются в соответствии с требованиями психоакустической модели. После кодирования определяется число неиспользованных битов для дальнейшего применения.

Внутренний итерационный цикл. Выполняемые в нем процедуры представлены на рис. 12.48. Квантование коэффициентов МДКП (блок 2) происходит по формуле

$$ix_i = \text{nint}\left[\left(\frac{|xr_i|}{\sqrt[4]{2}^{qquant+quantanf}}\right)^{0,75} - 0{,}0946\right], \quad i = 0.....576,$$

где nint означает, что берется ближайшее целое значение; ix_i и xr_i — соответственно квантованное и исходное значения i-го коэффициента МДКП; $qquant$ — указатель шага квантования, определяющий степень компрессии компрессии; $quantanf$ — шаг изменения величины $qquant$.

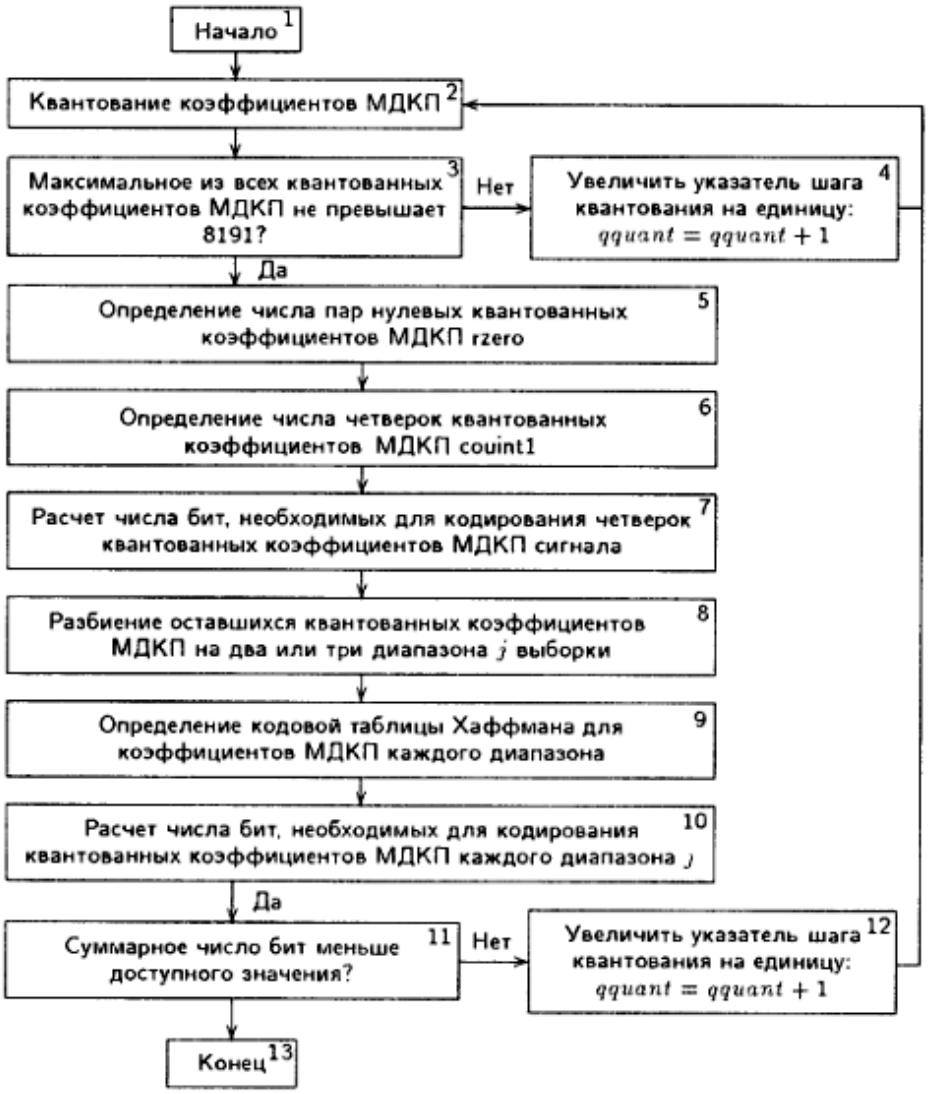


Рис. 12.48. Внутренний итерационный цикл алгоритма Layer 3 стандарта MPEG-1 ISO/IEC 11172-3

Начальное значение указателя шага квантования $qquant$ принимается равным нулю ($qquant = 0$). Далее оно меняется дискретно с шагом 1. Величина $qquant$ увеличивается на 1 (блок 4) до тех пор, пока не будет получена квантованная величина, лежащая в пределах самых больших значений из имеющихся в таблицах Хаффмана. Заметим, что максимально-допустимое квантованное значение равно 8191. При увеличении указателя шага квантования $qquant$ квантованные значения коэффициентов МДКП становятся ближе к их исходным значениям, т.е. квантование становится более точным.

На следующем шаге (блок 5) определяется число пар нулевых квантованных коэффициентов МДКП. Отсчет числа пар идет, начиная с верхнего индекса. Эти пары называются rzero. Затем в блоке 6 определяется число четверок коэффициентов МДКП, квантованные значения которых не превышают по модулю единицы, включая пары rzero. Эти четверки называются count1. На следующем этапе (блок 7) определяется число битов $bitsum_count1$, необходимое для кодирования квантованных значений этих четверок коэффициентов МДКП. При этом одно кодовое слово используется для кодирования одной четверки квантованных коэффициентов МДКП (count1). Для каждого четырехкомпонентного вектора определяется длина кодового слова с соответствии с таблицей A и затем в соответствии с таблицей B. Например, четырехкомпонентному i-му вектору $X_i^{(4)} = [0, 1, 1, 1]$ соответствует шестибитовое кодовое слово 000100 в соответствии с таблицей A или четырехбитовое кодовое слово 1000 в соответствии с таблицей B стандарта ISO/IEC 11172-3. В начале определяется число битов, необходимое для кодирования count1 путем независимого использования таблиц A ($bitsum_table0$) и B ($bitsum_table1$). Требуемые в обоих случаях числа битов сравниваются между собой и затем выбирается минимальное из них. Сюда же добавляются биты, необходимые для кодирования знака коэффициентов МДКП. Информация о том, какая таблица использована при кодировании, передается декодеру параметром «селекция таблицы» $count1table_select$, который равен 0 для таблицы A и 1 для таблицы B.

Пары квантованных коэффициентов МДКП, не входящие в count1 или rzero, называется значащими (bigvalues). В блоке 8 для каждой субполосы кодирования они разбиваются на 2 или 3 диапазона. В случае использования окон типа normal число диапазонов равно трем, а в случае окон типа short, start, stop — двум. Стратегия разбиения значащих квантованных коэффициентов МДКП на диапазоны однозначно в стандарте не определена.

После разбиения квантованных пар коэффициентов МДКП на диапазоны определяются кодовые таблицы для каждого из них (блок 9). Заметим, что при кодировании квантованных коэффициентов МДКП в каждом диапазоне используется своя таблица Хаффмана. В общей сложности имеются 32 разные кодовые таблицы Хаффмана. Они отличаются между собой максимальным значением квантованных коэффициентов МДКП, которое может быть кодировано, и учитываемой статистикой звукового сигнала (жанра сигнала), для которого каждая из таблиц оптимизирована. Параметрами таблиц кодов Хаффмана являются переменные x, y, $hlen$, $hcod$, $linbits$. Переменные x, y являются парой квантованных коэффициентов МДКП, кодируемых одним кодовым словом $hcod$ длиной $hlen$ В этих таблицах имеются только коды для коэффициентов МДКП, меньших 16. Для коэффициентов, больших или равных 16, имеются две другие таблицы, где наибольший коэффициент, равный 15, является исключающим символом. В этом случае число 15 кодируется дополнительным кодовым словом с использованием линейной ИКМ с длиной слова $linbits$.

Таблицы Хаффмана, имеющие одинаковые размеры, оптимизированы для разных статистик звукового сигнала. При этом дополнительная компрессия может быть получена, например, путем перебора всех имеющихся в наличии таблиц кодов Хаффмана и выбора той из них, использование которой требует меньшего числа битов при кодировании.

После кодирования проверяется условие (блок 11): суммарное число битов, необходимое для кодирования квантованных коэффициентов МДКП, меньше или больше доступного их числа? Если оно меньше доступного значения, то указатель шага квантования $qquant$ увеличивается на единицу. Внутренний итерационный цикл повторяется с новым значением $qquant$, и в результате происходит более точное квантование и кодирование коэффициентов МДКП. Этот процесс во внутреннем цикле повторяется до тех пор, пока общее число требуемых битов не будет чуть превышать их доступное значение при установленной скорости цифрового потока.

Внешний итерационный цикл. Внешний итерационный цикл (рис. 12.49) управляет искажениями, вызванными квантованием коэффициентов МДКП во внутреннем итерационном цикле. Прежде всего в блоке 3 для каждой из субполос кодирования n рассчитывается энергия искажений квантования $xfcf_n$, приходящаяся на один коэффициент МДКП для каждой из субполос кодирования:

$$xfsf_n = \frac{1}{k_n} \sum_{i=ilow}^{i=ihigh} (|xr(i)| - ix(i)^{4/3}(\sqrt[4]{2})^{qquant+quantanf})^2,$$

где $ilow$ и $ihigh$ — нижний и верхний индексы коэффициентов МДКП в субполосе кодирования n; $xr(i)$ и $ix(i)$ — соответственно исходное и квантованное значения i-го коэффициента МДКП в субполосе кодирования n; k_n — общее число коэффициентов МДКП в субполосе кодирования n.

Если в какой либо из субполос кодирования n энергия искажений квантования $xfcf_n$ превышает значение, рассчитанное психоакустической моделью, то квантованные коэффициенты МДКП данной субполосы корректируются. Корректирующий множитель вычисляется по формуле

$$ifqstep = (\sqrt{2})^{(1+scalefac_scale)scalefac_n}.$$

С учетом этой коррекции каждый коэффициент МДКП в субполосе кодирования n примет вид

$$xr_i = xr_i\sqrt{2}^{(1+scalefac_scale)scalefac_n}. \quad i = ilow_n, \ldots, ihigh_n,$$

где $scalefac_n$ — масштабный коэффициент для субполосы кодирования n, равный $scalefac_l_n$ или $scalefac_s_n$ соответственно для длинных или коротких блоков; $scalefac_scale$ — параметр, который управляет шагом изменения корректирующего множителя, этот параметр может иметь два значения 0 или 1. Масштабный коэффициент меняется ступенчато от нуля с шагом 1 до тех пор, пока он не превысит табличное значение, заданное в стандарте. Корректирующий множитель $ifqstep$ может иметь разные оказатели степени 1, 2, $pretab_n$, $2pretab_n$ и $scalefac_n$ в зависимости от ряда условий.

Цикл управления шумами квантования всегда начинается со значения $scalefac_scale = 0$. Если после некоторой итерации во внешнем цикле максимальное значение масштабного коэффициента выходит за пределы, указанные в специальной таблице, то параметр $scalefac_scale$ принимает значение, равное 1, для того, чтобы увеличить возможный диапазон изменения корректирующих множителей.

Масштабные коэффициенты $scalefac_n$ в субполосах кодирования, которые заданы величинами $scalefac_l_n$ (для длинных блоков) или $scalefac_s_n$ (для коротких блоков), а также указатель шага квантования $qquant$ передаются в составе цифрового потока декодеру.

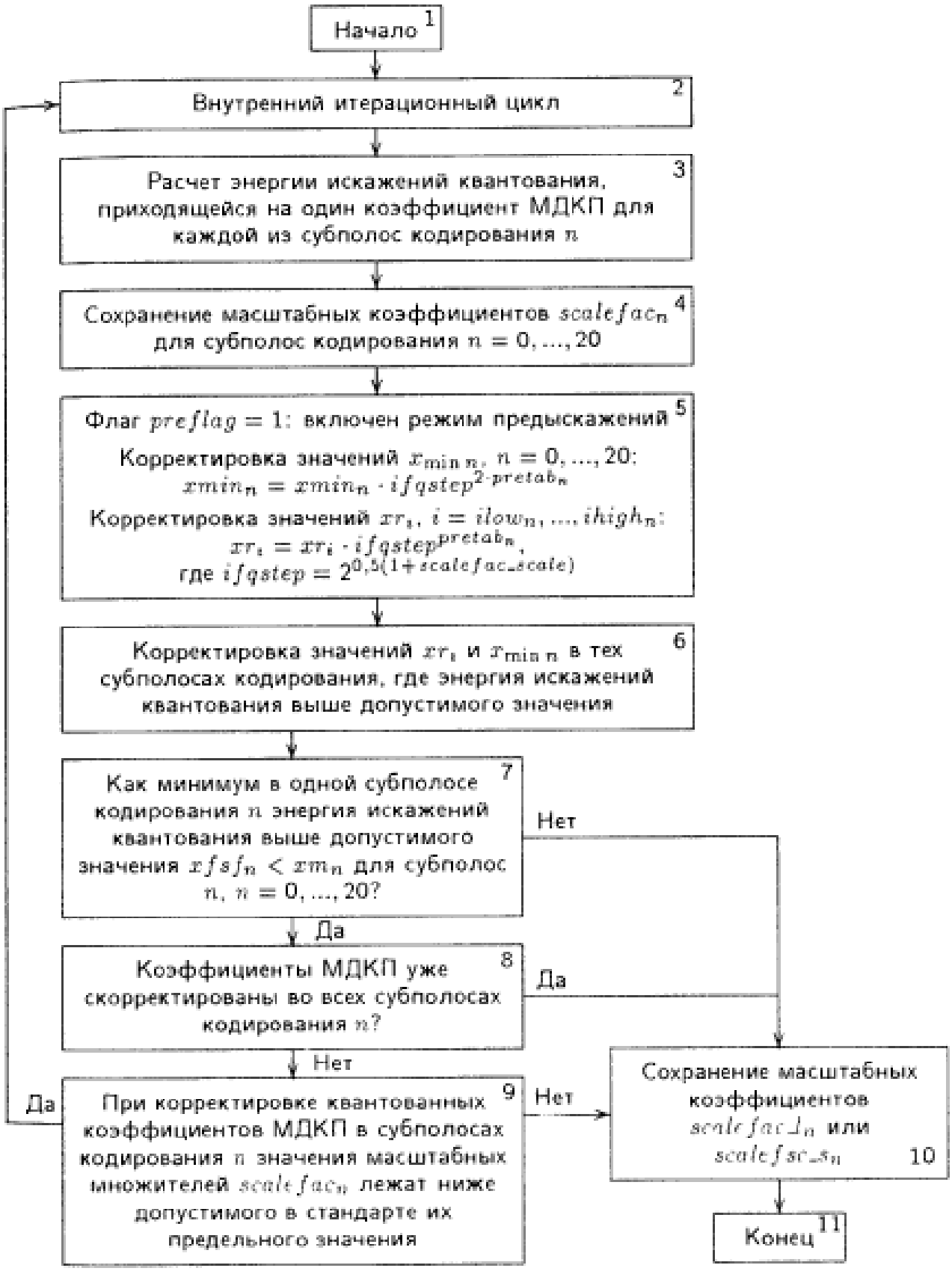


Рис. 12.49. Внешний итерационный цикл алгоритма Layer 3 стандарта MPEG-1 ISO/IEC 11172-3

При каждой итерации внешнего цикла вызывается внутренний итерационный цикл, где происходит квантование и кодирование коэффициентов МДКП. Выходными параметрами внутреннего цикла при каждой новой итерации является число использованных битов и массив квантованных коэффициентов МДКП ix (0...575).

В блоке 4 сохраняются масштабные коэффициенты во всех субполосах кодирования для передачи их декодеру.

Флаг $preflag$ включает режим предыскажений (блок 5). Он используется при установлении флага $preflag = 1$. Режим предыскажений дает возможность дополнительной корректировки квантованных коэффициентов МДКП в высокочастотной части спектра ЗС. Режим предыскажений реализуется в соответствии с имеющимися в стандарте для этой цели таблицами. Он может быть включен, если во всех четырех верхних субполосах кодирования энергия искажений квантования выходит за допустимые значения уже после первого вызова внутреннего итерационного цикла. Если кодируются коэффициенты МДКП гранулы 1 (вторая выборка коэффициентов МДКП аудиофрейма) и параметр $scfsi$ активизирован ($scfsi = 1$) по крайней мере в одной группе субполос кодирования ($scfsi_band$), то режим предыскажений в грануле 1 устанавливается таким же, как и в грануле 0. Величина $scfsi$ несет информацию о том, какие масштабные коэффициенты гранулы 0 могут быть использованы и для гранулы 1. В этом случае масштабные коэффициенты в грануле 1 уже не передаются.

В блоке 6 все квантованные значения коэффициентов МДКП тех субполос кодирования, в которых (после введения режима предыскажений) энергия искажений квантования $xfsf_n$ превышает допустимые значения xm_n, подвергаются корректировке. Корректирующий множитель $ifqstep$ передается декодеру при помощи параметра $scalefac_scale$, ибо эти параметры связаны между собой соотношением

$$ifqstep = 2^{(0.5(1+scalefac_scale))}.$$

При этом параметр $scalefac_scale$ имеет свое первоначальное значение равное 1.

На завершающем этапе внешнего цикла проверяется условие его прекращения. Обычно цикл прекращается, если нет субполос кодирования с искажениями квантования, энергия которых превышает допустимые значения, рассчитанные в психоакустической модели кодера. Однако не всегда удается выполнить это условие, особенно при малых скоростях цифрового потока. В этом последнем случае предусмотрены другие условия для прекращения внешнего итерационного цикла.

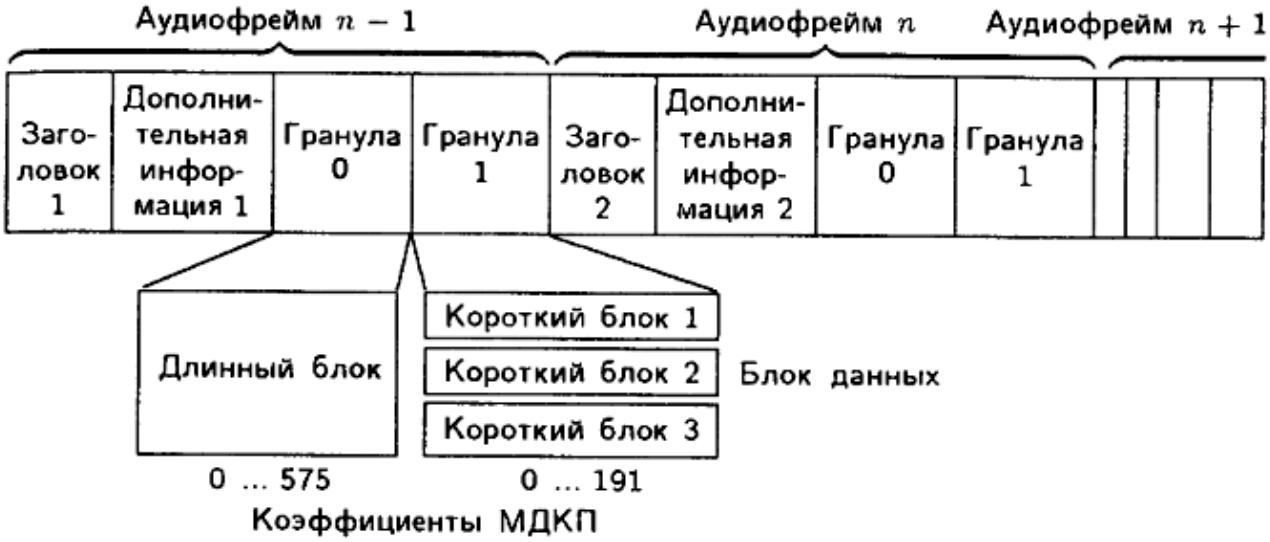


Рис. 12.50. Структура данных аудиофрейма стандарта MPEG-1 ISO/IEC 11172-3 Layer 3

Структура цифрового потока. Каждый аудиофрейм стандарта MPEG-1 IS0/IEC 11172-3 Layer 3 содержит: заголовок, представляющий собой служебную информацию, блок дополнительной информации и блок цифровых аудиоданных, состоящий из двух гранул. Каждая гранула содержит информацию о 576 коэффициентах МДКП. Структура цифрового потока представлена на рис. 12.50. В качестве примера взят случай, когда гранула 0 представляет собой последовательность 576 коэффициентов МДКП (длинный блок), а гранула 1 — последовательность из трех коротких блоков, каждый из которых содержит информацию о 192 коэффициентах МДКП.

Число битов, выделяемое для кодирования каждого вида служебной и дополнительной информации, представлено отдельными таблицами (таблицы A.7 и A.8 стандарта MPEG ISO/IEC 11172-3)

5. Стандарт стиснення мовних сигналів MPEG-2

Общие сведения. Он дополняет стандарт MPEG-1, расширяя его на всю совокупность звуковых форматов, предусмотренных документом 10/63E ITU-R В MPEG-2 ISO/IEC 13818-3 может быть организована передача звуковых сигналов следующих форматов

3/2 (L, R, C — соответственно левый, правый и центральный фронтальные сигналы, LS, RS — левый и правый пространственные сигналы) плюс канал сверхнизких частот СНЧ,

3/0 (L, R, C) плюс 2/0 (L_2, R_2 — дополнительные второй левый и второй правый сигналы).

3/1 (L, C, R, S, где S — сигнал «окружения» (Surround));
2/0 (L, R) плюс 2/0 (L_2, R_2);
3/0 (L, C, R);
2/1 (L, R, S);
2/0 (L, R — обычное стерео);
1/0 (моно).

При этом пространственные сигналы LS и RS имеют полосу частот 100...7000 Гц, как это принято в системах Dolby Surround и Dolby Pro Logic. Полоса частот сигнала C ограничена сверху значением 9000 Гц, и лишь два сигнала L и R имеют полную полосу частот 20...20000 Гц. В отличие от этого в цифровых системах Dolby Digital все каналы (кроме канала СНЧ) по полосе частот равноценны (20...20000 Гц).

В стандарте MPEG-2 ISO/IEC 13818-3 расширено также число используемых частот дискретизации: дополнительно к ранее предусмотренным значениям частот дискретизации 32, 44,1 и 48 кГц (MPEG-1) добавлены значения 16, 22,05 и 24 кГц. Он позволяет наряду с многоканальными стереофоническими сигналами форматов 3/2 + СНЧ, Dolby Surround, Dolby Pro Logic передавать также одновременно сигналы обычной стереофонии и речь на двух языках, моносигнал и дополнительно до семи комментаторских каналов с более низким качеством, используя частоты дискретизации 16, 22,05 и 24 кГц.

Структура многоканальной системы передачи стандарта MPEG-2 ISO/IEC 3818-3 представлена на рис. 12.51,*а*. В соответствии с документом 10/63E ITU-R исходным на студийной стороне является пятиканальный сигнал, состоящий из сигналов вида L, C, R, LS, RS — соответственно левого, центрального, правого фронтальных и левого и правого пространственных сигналов. На передающей стороне при помощи матрицы M1 они преобразуются в новую совокупность сигналов, два из которых T_1, T_2 являются сигналами обычной двухканальной стереофонии (для них выполняется требование совместимости: $T_1 + T_2 = M$, где M — полноценный монофонический сигнал), а три остальных сигнала T_3, T_4 и T_5 представляют собой так называемое многоканальное расширение Уравнения матрицирования имеют вид:

$$T_1 = \alpha(L + \beta C + \gamma LS),$$
$$T_2 = \alpha(R + \beta C + \gamma RS);$$
$$T_3 = \alpha\beta C,$$
$$T_4 = \alpha\gamma LS,$$
$$T_5 = \alpha\gamma RS.$$

где α, β, γ — коэффициенты матрицирования, их значения зависят от режима работы системы передачи. Коэффициент α необходим для устранения возможной перегрузки при одновременной передаче сигналов T_1, ..., T_5. Всего возможных режимов работы четыре

режим работы 0 — $\alpha = 1/(1+\sqrt{2})$, $\beta = 1/\sqrt{2}$, $\gamma = 1/\sqrt{2}$.

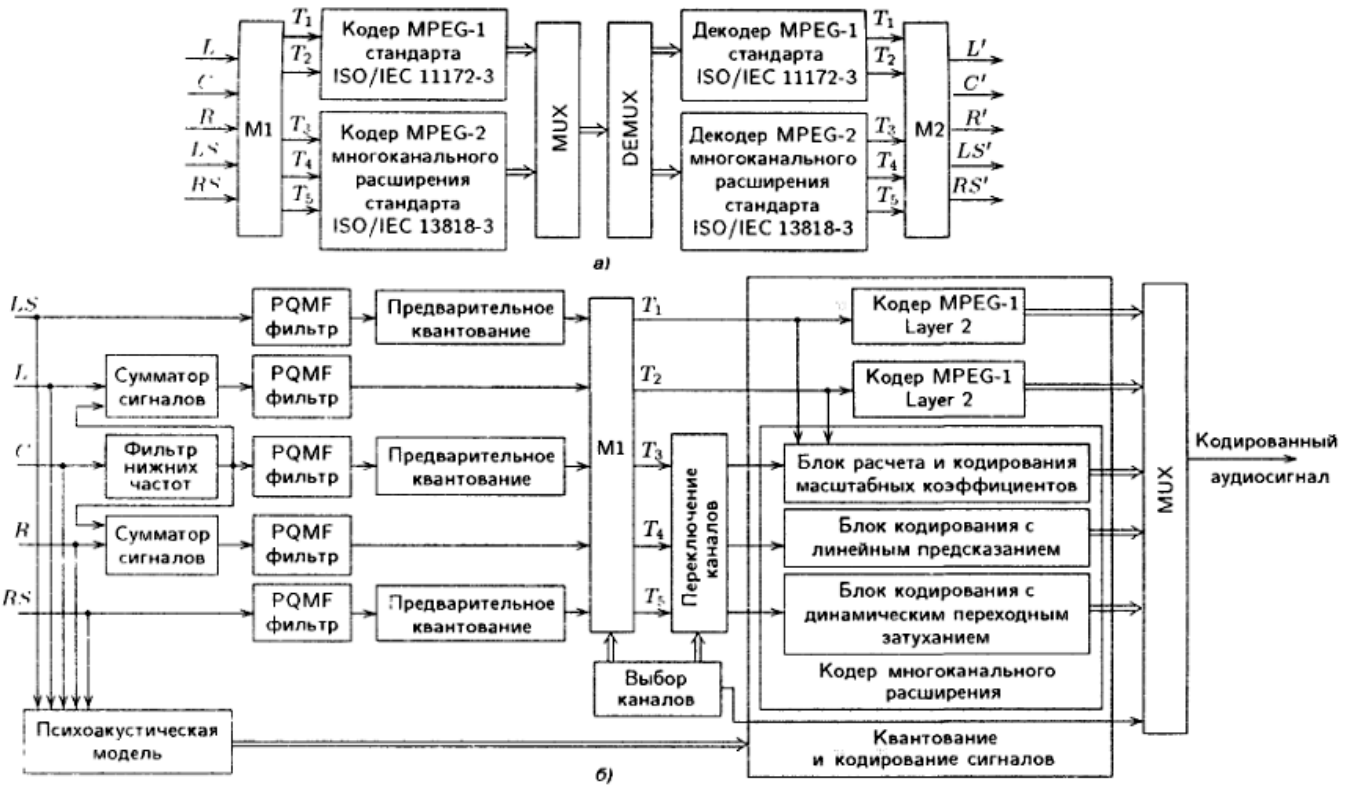


Рис. 12.51. Структурная схема кодека MPEG-2 стандарта ISO/IEC 13818-3 (многоканальная конфигурация) (*а*) и кодера MPEG-2 ISO/IEC 13818-3 Layer 2 (*б*)

Таблица 12.2

Сочетания передаваемых сигналов в стандарте MPEG-2 ISO/IEC 13818-3

Число каналов передачи	Конфигурация (формат воспроизведения)	Передаваемые сигналы
5	3/2	L, C, R, LS, RS
5	3/0+2/0	$L, C, R+L_2, R_2$
4	3/1	L, C, R, S (Surround)
4	2/0 + 2/0	$L, R+L_2, R_2$
3	3/0	L, C, R
3	2/1	L, R, S
2	2/0	L, R (Стерео)
1	1/0	Моно

режим работы 1 — $\alpha = 1/(1{,}5+0{,}5\sqrt{2})$; $\beta = 1/\sqrt{2}$; $\gamma = 0{,}5$;

режим работы 2 — $\alpha = 1/(1+\sqrt{2})$; $\beta = 1/\sqrt{2}$; $\gamma = 1/\sqrt{2}$;

режим работы 3 — $\alpha = \beta = \gamma = 1$.

Режим 2 соответствует передаче сигналов системы Dolby Surround. Поэтому перед кодированием должен быть сформирован сигнал окружения $S = 0{,}5(LS + RS)$, который в противофазе далее должен быть добавлен к сигналам L и R, как это обычно и выполняется в кодере системы Dolby.

После матрицирования полученные сигналы T_1, T_2,...,T_5 кодируются (рис. 12.51,*а*). Для кодирования сигналов T_1 и T_2 используется кодер MPEG-1 ISO/IEC 11172-3 со всеми имеющимися в нем уровнями компрессии Layer 1, Layer 2 и Layer 3. Дополнительные сигналы T_3, T_4 и T_5 кодируются отдельно в так называемом MPEG-2 кодере многоканального расширения. Далее оба цифровых потока форматируются, образуя аудиофрейм стандарта MPEG-2 ISO/IEC 13818-3.

Возможны практически любые сочетания передаваемых конфигураций звуковых форматов (табл. 12.2). В этой таблице L_2 и R_2 — дополнительные второй левый и второй правый сигналы.

При любом сочетании возможна передача сигнала СНЧ. Этот канал имеет параметры: частоту дискретизации $f_д/96$, ширину полосы 125 Гц, разрешение не менее 20 бит/отсчет. Частота дискретизации при передаче основных сигналов T_1 и T_2 составляет 32, 44,1 и 48 кГц, дополнительных сигналов многоканального расширения T_3, T_4, T_5 — 16, 22,05 и 24 кГц

На приемной стороне системы передачи (рис. 12.51,*а*) общий цифровой поток разделяется демультиплексором (DEMUX) на два, один из которых поступает на MPEG-1 декодер, а второй — на декодер MPEG-2 многоканального расширения После декодирования сигналы поступают на инверсную матрицу М2 для их окончательного восстановления

Кодирование сигналов многоканального расширения. Напомним еще раз, что для кодирования основной пары сигналов T_1 и T_2 используются алгоритмы компрессии реализованные в MPEG 1, и лишь при кодировании сигналов многоканального расширения (T_3 T_4 и T_5)

применяют более простые методы. Это объясняется тем, что при многоканальной стереофонии в каждый текущий момент времени не требуется точная передача всей информации, содержащейся в каждом из сигналов. Как правило, вся необходимая для полноценного восприятия информация в текущий момент времени содержится не более чем в двухтрех сигналах, остальные же из них в этот момент времени являются как бы «фоновым дополнением». В стандарте MPEG-2 ISO/IEC 13818-3 для получения максимально возможной компрессии цифровых аудиоданных при кодировании сигналов многоканального расширения T_3, T_4, T_5 учитывается степень корреляции между основными и дополнительными сигналами. Если корреляция сильная, то от независимого кодирования каждого из дополнительных сигналов можно отказаться и передавать лишь их различия по отношению к основным сигналам, используя адаптивное предсказание в MPEG-2 кодере. Кроме того, если для синтеза пространственной панорамы использовался метод интенсивностной стереофонии, то значительная доля информации в сигналах, определяющих восприятие, идентична. В этой связи в стандарте для еще большей компрессии данных используется также процедура динамического изме-

нения переходного затухания между дополнительными сигналами, когда изменяются во времени лишь соотношения уровней воспроизводимых сигналов. Часто встречаются также ситуации, когда эти сигналы отличаются только уровнями в определенных группах субполос, поэтому для них достаточно передать только масштабные коэффициенты, а сами отсчеты восстанавливаемого сигнала могут быть взяты из сигнала другого канала. Все это позволяет дополнительно экономить биты при передаче сигналов многоканального расширения. Однако следует заметить, что критерии для перехода кодера в тот или иной режим кодирования сигналов многоканального расширения в стандарте не определены и это создает определенные трудности при их реальном использовании. Более подробная структурная схема кодера MPEG-2 ISO/IEC 13818-3 для Layer 2 представлена на рис. 12.51,*б*.

Психоакустическая часть кодеров стандартов MPEG-1 ISO/IEC 11172-3 и MPEG-2 ISO/IEC 13818-3 одинакова.

Структура аудиоданных в стандарте MPEG-2 ISO/IEC 13818-3. Напомним, что аудиофрейм формата MPEG-1 ISO/IEC 11172-3 содержит:

1) преамбулу (Header) информации (32 бита);

2) биты избыточности для помехоустойчивого кодирования (CRC) с целью обнаружения и коррекции ошибок (16 битов);

3) аудиоданные, информацию о распределении битов по полосам частот для слоя Layer 2 (BAL), информацию о селекции МК (SCFSI), значения МК (SCF) и отсчеты ЗС для отдельных частотных полос;

4) дополнительные данные, длина которых не определена из-за гибкости применений.

Два формата аудиофрейма, предусмотренных стандартом MPEG-2 ISO/IEC 13818, изображены на рис. 12.52 и 12.53. Прежде всего рассмотрим формат структуры данных, когда он обратно совместим с MPEG-1 (рис. 12.52).

Структура цифровых аудиоданных сигналов T_1 и T_1 стандарта MPEG-2 ISO/IEC 1381-3 соответствуют формату аудиоданных в MPEG-1. Информация о сигналах T_3, T_4, T_5 располагается в первой части аудиофрейма, относящейся к передаче дополнительных данных (AD). Здесь также имеются своя преамбула (MC-Header), биты для помехоустойчивого кодирования (MC-CRC), часть, относящаяся к передаче собственно аудиоданных сигналов T_3, T_4, T_5, и часть для передачи дополнительной информации. Требуемая скорость для передачи битов сигналов T_3, T_4, T_5 в многоканальной системе может варьироваться от фрейма к фрейму в зависимости от характеристик ЗС. Остаток части аудиофрейма может

также предоставляться для передачи других дополнительных данных, например речевых сигналов. Общая (суммарная) скорость передачи битов поддерживается постоянной в соответствии со стандартом MPEG-1 ISO/IEC 11172-3. Частота дискретизации для основных сигналов T_1, T_2 составляет 48, 44,1 или 32 кГц; для сигналов дополнительного многоканального расширения — 24, 22,05 и 16 кГц. Возможные комбинации передаваемых сигналов приведены в табл. 12.2. Заметим, что в стандарте MPEG-2 сдержится 29 таблиц расположения аудиоданных передаваемых сигналов, которые приписывают сигнальные компоненты к каналам T1,..., T5.

Структура данных для случая введения дополнительного по сравнению с MPEG-1 расширения показана на рис. 12.53. Аудиофрейм данных начинается с преамбулы (Header), за которой следует биты помехоустойчивого кодирования (CRC). Следующие биты служат в Layer 2 для кодирования распределения битов в субполосах (BAL), информации о распределении МК (SCFSI), за которыми расположены значения МК (SCF) и аудиоданные отсчетов полосных сигналов, соответствующие по структуре формату данных MPEG-1 ISO/IEC 11172-3 для основной пары сигналов $Л$ и $П$. Затем следуют дополнительные данные многоканального расширения (MC). Эта вторая часть фрейма вновь начинается с преамбулы (MC-Header), далее идут данные помехоустойчивого кодирования MC-CRC, а также информация о дополнительных каналах MC-BAL, информация о распределении битов по субполосам MC-SCFSI, селекции МК MC-SCF, значения МК MC Subband Samples. Далее следуют аудиоданные, вначале *MC-предсказание*, затем *MC-данные групп частотных полос* и, наконец (если имеются в наличии), многоязыковые каналы (до семи комментаторских каналов). Вся эта совокупность данных многоканального расширения располагается на месте дополнительных данных стандарта ISO/IEC 11172-3, и лишь потом могут еще следовать дополнительные данные. Формат этих дополнительных данных представлен на рис 12.53 внизу справа. Он начинается с синхронизации части расширения (Sync), за которой следует расширение CRC, указание о длине расширения (ext Lange), собственно аудиоданные расширения (ext MC-аудиоданные) и возможные дополнительные данные (MC-дополнительные данные 2). Этот поток расширения позволяет превысить максимальную скорость данных, предусмотренную стандартом MPEG-1 384 кбит/с. Но одновременно остается учтенным основное требование к обратной совместимости аудиофрейма.

MPEG-1 декодер использует лишь часть аудиофрейма, соответствующих его норме MPEG-2 декодер может перерабатывать всю информацию, включая и это последнее дополнительное расширение

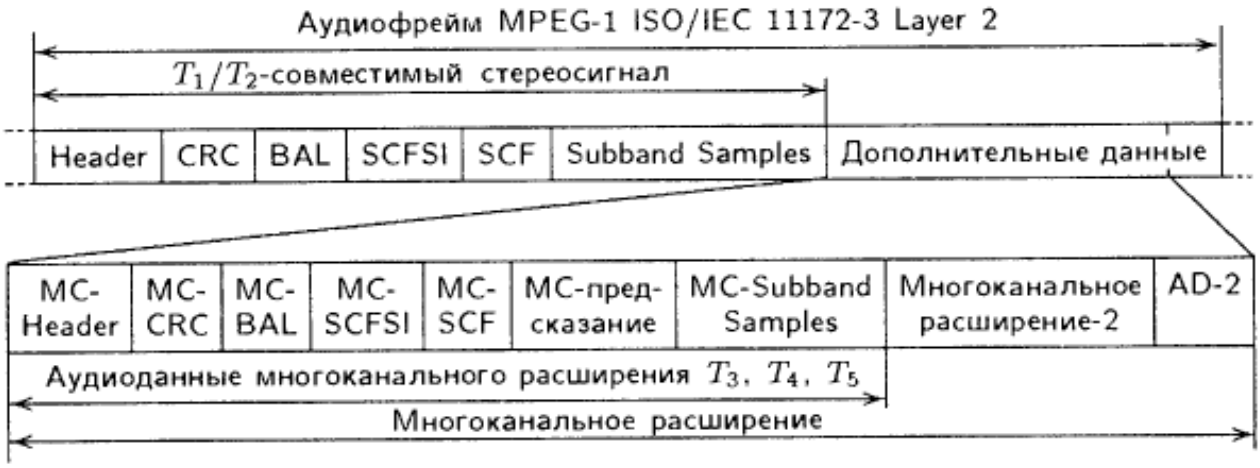


Рис. 12.52. Структура данных аудиофрейма MPEG-2 стандарта ISO/IEC13818-3 Layer 2 при отсутствии дополнительного расширения

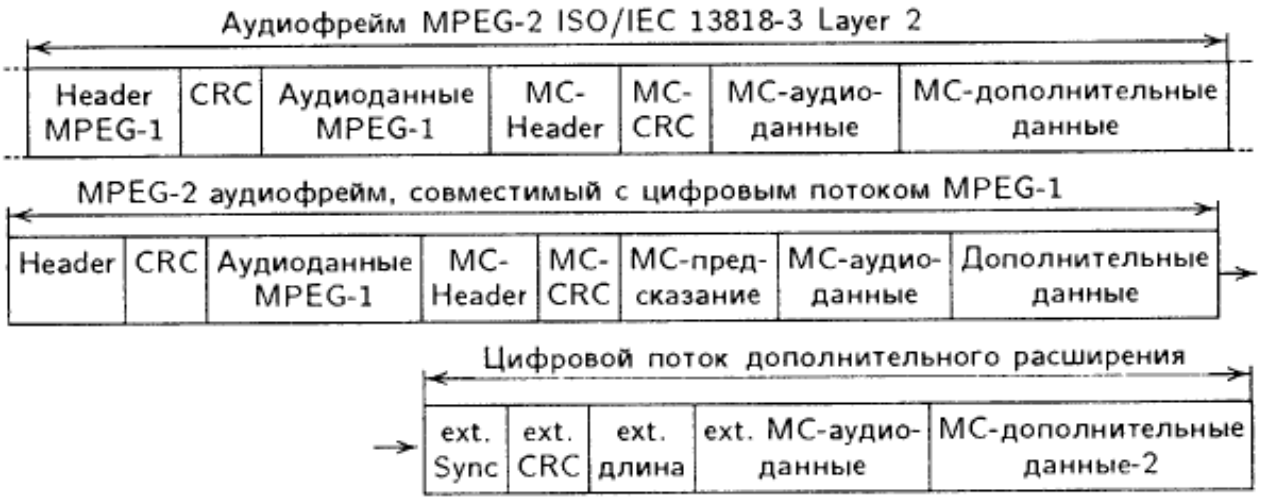


Рис. 12.53. Структура данных аудиофрейма MPEG-2 ISO/IEC 13818-3 с дополнительным расширением

6. Стандарт стиснення мовних сигналів MPEG-2 AAC

Алгоритм компрессии AAC (Advanced Audio Coding) разработан в рамках стандарта MPEG-2 Он базируется на учете опыта, накопленного при разработке алгоритма компрессии Layer 3 стандартов ISO/IEC 11172-3 и 13818-3, поддерживает все известные звуковые форматы моно, обычное стерео, разновидности систем Dolby, пятиканальный звуковой формат 5 1 В отличие от MPEG-2 ISO/IEC 13818-3 здесь (рис 12 54)

расширен набор возможных частот дискретизации: 8; 11,025; 16; 22,05; 24; 32; 44,1; 48; 64; 88,2 и 96 кГц; изменены форма и длины оконных функций: здесь используются окна Кайзера–Бесселя вместо синусных: длинное, включающее 2048 отсчетов ЗС и короткое — соответственно 256 отсчетов ЗС, что обеспечивает более высокое разрешение по частоте, при этом в обоих случаях используется 50 % перекрытие выборок отсчетов ЗС. Кодированию подвергаются коэффи-

циенты МДКП, однако несколько изменена форма кривой компрессии при неравномерном квантовании, применены иные книги кодов Хаффмана. Как и в Layer 3, управление величиной искажений квантования выполняется по двум итерационным циклам — внутреннему и внешнему.

В алгоритме AAC для повышения качества алгоритма компрессии цифровых данных применены специальные процедуры минимизации, точнее говоря управления микроструктурой искажений квантования внутри каждой из субполос (так называемая техника Temporal Noise Shaping, TNS); изменены процедуры объединения субполосных сигналов при их кодировании (Coupling); предусмотрена, как и ранее, возможность работы кодера в режиме M/S кодирования, когда кодированию в субполосах подвергаются не сигналы L и R стереопары, а их сумма $M = (L+R)/\sqrt{2}$ и разность $S = (L - R)/\sqrt{2}$. При линейном предсказании учитывается не только корреляция между отсчетами многоканального сигнала, но и форма спектра шумов квантования и его изменение во времени. Введены уточнения и дополнительные процедуры при расчете глобального порога маскировки в психоакустической модели кодера AAC. Однако и здесь основой является модифицированная психоакустическая модель 2, как и в Layer 3.

В зависимости от вычислительной сложности и области применения в стандарте ISO/IEC 13838-7 AAC три возможных конфигурации.

Основная конфигурация (Main profile) используется, когда вычислительная сложность алгоритма не является сдерживающим фактором при реализации кодека. При данной конфигурации в кодере не используется банк PQMF-фильтров Вся последовательность из 2048 временны́х отсчетов ЗС непосредственно подается на блок ортогонального преобразования с 50%-ным перекрытием. Порядок предсказания блока TNS составляет 20

Конфигурация пониженной сложности (Low Complexity profile). Здесь также не используются банк PQMF-фильтров и блок линейного предсказания, порядок предсказания блока TNS сокращен с 20 до 12.

Адаптивная конфигурация (Scalable Sampling Rate) При данной конфигурации кодера, в отличие от двух предыдущих, используется банк PQMF-фильтров, блок предсказания по-прежнему не используется, а порядок предсказания блока TNS составляет 12 Кроме того, не всегда требуется передавать сигнал в полосе частот 20 20000 Гц, а иногда это и невозможно в силу ограниченной пропускной способности канала

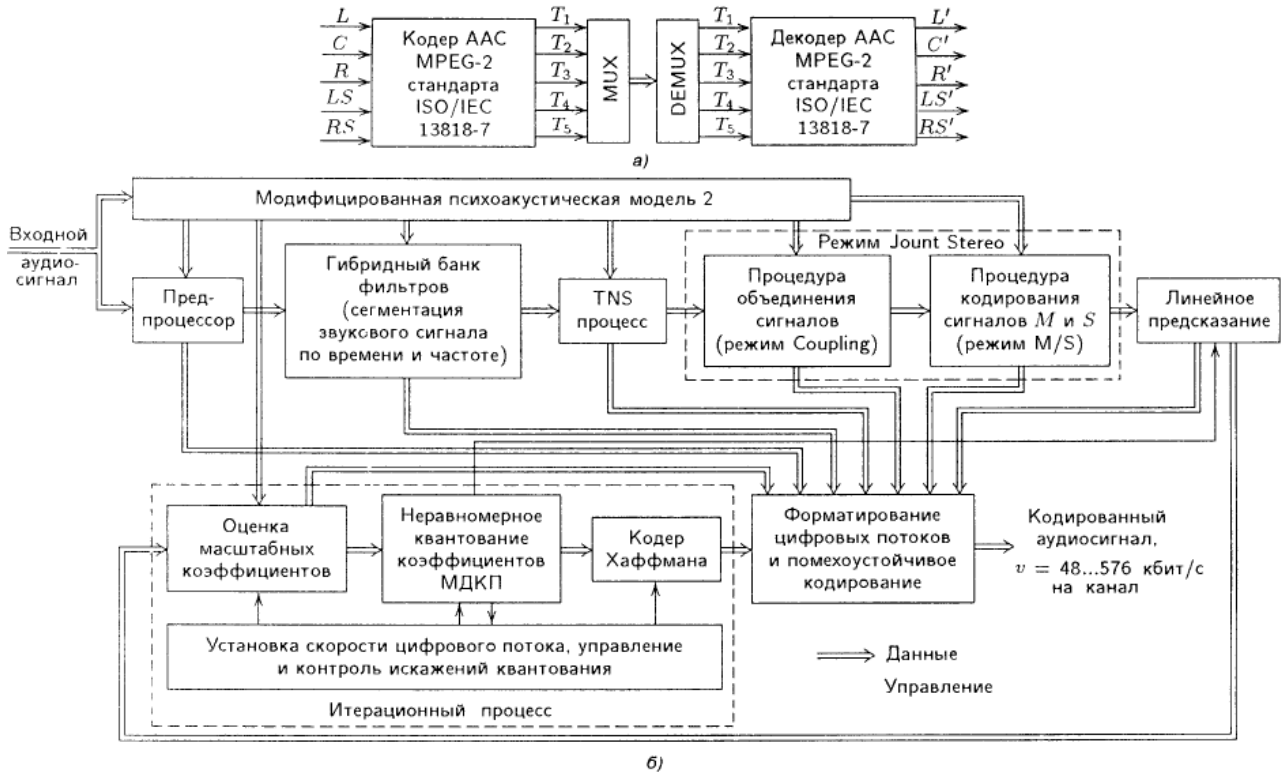


Рис. 12.54. Многоканальная конфигурация (*а*) и структурная схема кодера MPEG-2 AAC стандарта ISO/IEC 13818-7 (*б*)

связи, поэтому стандарт определяет так называемую адаптивную конфигурацию, позволяющую изменять полосу передаваемых частот звукового сигнала. Например, можно передать звуковой сигнал в следующих полосах частот: от 20 до 6000, от 20 до 12000 и от 20 до 18000 Гц.

Тестовые прослушивания показали, что алгоритм компрессии AAC обеспечивает так называемое прозрачное кодирование при скорости цифрового потока 64 кбит/с на канал. При звуковом формате 5.1 искажения, вызванные компрессией, лежат ниже порогов их слуховой заметности уже при суммарной скорости цифрового потока 320...384 кбит/с.

7. Стандарт стиснення мовних сигналів MPEG-4

Это стандарт разработан для мультимедиа приложений, охватывающих большое число известных мультимедийных систем от несложных мобильных с упрощенными терминалами оконечных устройств до высококачественых профессиональных звуковых систем. Он объединяет опыт, накопленный группой MPEG при разработке всех рассмотренных выше алгоритмов компрессии цифровых данных и алгоритмов компрессии речи, в частности включает CELP-кодер. В MPEG-4 впервые при компрессии цифровых данных высококачественных звуковых сигналов предложено использовать параметрическое кодирование, когда реальный звуковой сигнал представляется в виде модели, содержащей со-

вокупность тональных и шумоподобных сигналов (рис. 12.55). В информационной части стандарта MPEG-4 приведены две психоакустические модели. Обе они могут быть использованы в любом слое алгоритма MPEG-4.

Рис. 12.55. Алгоритмы компрессии цифровых данных MPEG-4 стандарта ISO/IEC 14496-3

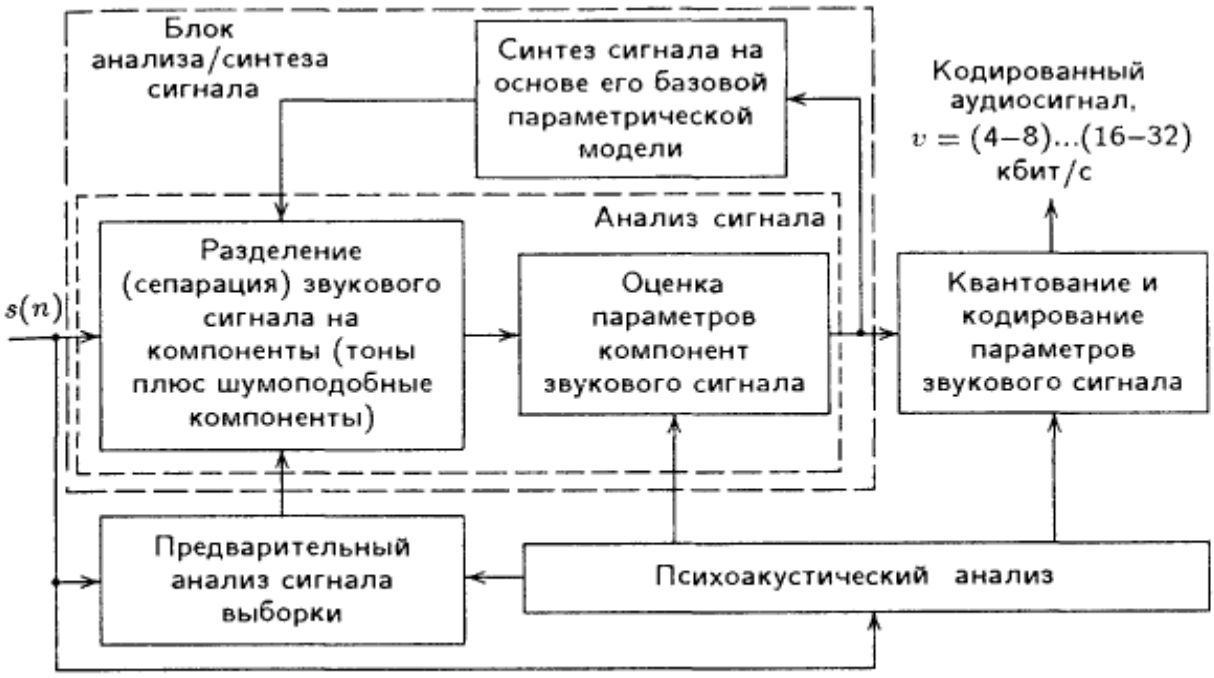


Рис. 12.56. Упрощенная структурная схема кодера, использующего метод параметрического кодирования звукового сигнала (стандарт MPEG-4 ISO/IEC 14496-3)

В случае использования алгоритма параметрического кодирования (рис. 12.56) исходный сигнал выборки $s(n)$ в блоке анализа-синтеза разделяется на тональные и шумоподобные составляющие, далее для этой базовой параметрической модели сигнала оцениваются значения текущих частот, фаз и амплитуд тональных сигналов и уровней энергии шумоподобных сигналов в определенных полосах частот. Перечисленные параметры квантуются и кодируются минимально возможным числом битов. Требуемое для их кодирования число битов определяется по психоакустической модели. На приемной стороне системы по этим параметрам синтезируется исходный сигнал. До последнего времени параметрическое моделирование использовалось только при компрессии цифровых данных речевых сигналов, более простых по своей структуре, чем музыкальный сигнал. Однако в последние годы благодаря успехам вычислительной техники, математического моделирования, психофизики и электроники параметрическое представление все чаще начинает применяться и при кодировании высококачественных звуковых сигналов, обеспечивая более высокий уровень компрессии цифровых данных. Параметрическое кодирование, обладая очень сложными процедурами оценки параметров и требующее при реализации существенно больших вычислительных затрат, позволяет получить скорость цифрового потока 16...24 кбит/с при достаточно хорошем качестве.

Вторым альтернативным алгоритмом, обеспечивающим более высокое качество, однако при большей скорости цифрового потока, является алгоритм AAC (MPEG-2 ISO/IEC 13818-7), также вошедший в этот стандарт.

8. Боротьба з помилками в цифрових системах передачі. Передискретизація

8.1 Боротьба з помилками в цифрових системах передачі

У цифрових каналах мовлення середня ймовірність виникнення помилки складає 10^{-5} … 10^{-6}, а в деяких випадках і 10^{-4}. Це означає неухильний вплив помилок на якість звукопередачі.

Виявлення і виправлення помилок вимагає введення в цифровий потік сигналу додаткових (перевіряючих і коректуючих) символів, які являються по відношенню до переваданих сигналів «надлишковими». Вони вводяться в загальний цифровий потік після того, як сигнал з виходу АЦП розділиться на блоки.

На приймальній стороні ці блоки піддаються додатковій цифровій обробці, результатом якої є виявлення пошкоджених символів і заміна останніх на правильні.

Для виправлення помилок необхідно визначити місце уражених символів всередині аналізованого блоку даних, а потім виконати більш складну задачу – виправити помилки.

Помилки можуть бути одиночними (порівняно рідкими) і згруповані в пакети. *Під пакетом помилок* розуміють явище двох і більше помилок в межах однієї m – розрядної кодової комбінації. Якщо помилки являються статистично незалежними, то ймовірність появи помилок кратності q рівна:

$$Pq=C^{q}_{m}p^{q}_{пом}(1-p_{пом})^{m-q}$$

де C^{q}_{m} – число сполучень із m символів по q.

Для 10 – розрядних кодових слів (m=10) ймовірність виникнення подвійних помилок при початковій ймовірності $p_{пом}=10^{-5}$ складає $P_2=5*10^{-9}$, а при $p_{пом}=10^{-4}$ вже $P_2=5*10^{-7}$. Це відповідає появі однієї подвійної помилки кожні 2.5 … 3 хв.

У цифрових каналах передачі при середній ймовірності виникнення помилки $p_{пом}=10^{-4}$ і вище виникають кореляційні помилки, які викликані дією імпульсних завад, недосконалістю систем комутації та ін. В цьому випадку ймовірність виникнення помилок великої кратності зростає.

Особливо велика роль пакетів помилок в каналах цифрового магнітного запису та в системі компакт-диску через можливість пошкодження носія запису. Наслідки передачі неякісної програми з подібних носіїв по каналам мовлення очевидні.

Системи виправлення помилок повинні боротися не лише з одиночними помилками, але і з пакетами помилок, помітність яких суттєво вища. Зі зростанням кратності помилок збільшується необхідна надлишковість коректуючих кодів, яку необхідно вносити в сигнал мовлення, який передається. Необхідна надлишковість тим більша, чим більше число розрядів кодової групи необхідно захищати.

З урахуванням помітності спотворень в системах цифрової передачі (і запису) звукових сигналів зазвичай захищаються від помилок п’ять – шість старших розрядів символів кодованих відліків, а також службові біти (які визначають, наприклад, номер шкали квантування при майже миттєвому компандуванні). Помилки в молодших розрядах (якщо частота їх виникнення не дуже велика) достатньо виявляти і потім маскувати, використовуючи методи інтерполяції.

Отже, вибір способу виявлення помилок, методу їх маскування та виправлення (можливо лише при використанні завадостійкого кодування) залежить від середнього значення ймовірності виникнення помилок і того, являються вони одиничними чи груповими (пакетами).

Простіше боротися з одиничними (непакетованими) помилками. Тому природнім являється прийом, за допомогою яких групу (пакет) помилок спочатку перетворити в одиничні. Такий прийом широко застосовується в багатьох системах передачі інформації цифрових потоків (пакетного радіозв’язку, системах мобільного зв’язку, у даному випадку - сотового). Цей

прийом називається перемеженням символів. Він знаходить застосування в апаратурі цифрового запису сигналів мовлення і звукопередачі.

Перемеження символів. Стосовно апаратури звукозапису існує 3 можливих способи перемеження:

- Перемеження розрядів *в межах кодового слова*, яке відповідає одному відліку звукового сигналу
- Перемеження між розрядами *різних відліків* сигналу звукового мовлення
- Розосереджене розміщене цифрового сигналу *в канальних інтервалах* циклу цифрової системи передачі.

Ідея першого способу ілюструється на рис. 12.3.

Тут кодове слово є 12 –символьним, із яких 11 – інформаційні, а один (b_1) – перевірковий (визначається як сума по модулю 2 п'яти старших інформаційних розрядів a_{11}, a_{10}, …, a_7). Нагадаємо, що символи a_1 … a_{11} є коефіцієнтами у співвідношенні (11.1) оцифрованого відліку. Молодші розряди (a_1, a_2, …), число яких зазвичай рівне чи більше половини всіх розрядів відліку, розміщуються рівномірно між старшими розрядами. Перевірковий розряд знаходиться в останній позиції.

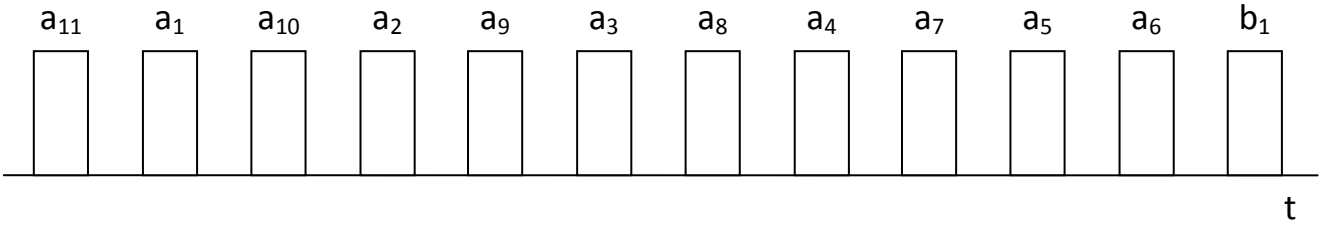


Рис. 12.3 Перемеження розрядів всередині 12 – символьного кодового слова

Підготовлений в області кодування читач може переконатися, що в цьому випадку пакети помилок, складені із двох символів, і 40% пакетів помилок тривалістю в 3 символи приводять до виникнення лише одиничної (односимвольної) помилки на виході декодеру.

Перемеження розрядів різних відліків принципово дозволяє виправляти пакети довільної тривалості, перетворюючи їх в одиночні.

На рис.12.4 зображено наступне. В рядку *1* умовна записана вихідна послідовність кодових слів по вісім символів в кожному.

1) $a_1\ a_2\ a_3\ a_4\ a_5\ a_6\ \boldsymbol{a_7\ a_8\ б_1\ б_2\ б_3\ б_4\ б_5}\ б_6\ б_7\ б_8\ в_1\ в_2\ в_3 \ldots ж_7\ ж_8\ з_1\ з_2 \ldots з_8$

2) $a_1\ б_1\ в_1\ г_1\ д_1\ е_1\ \boldsymbol{ж_1\ з_1\ а_2\ б_2\ в_2\ г_2\ д_2}\ е_2\ ж_2\ з_2 \ldots ж_7\ з_7\ а_8\ б_8\ в_8\ г_8\ д_8\ е_8\ ж_8\ з_8$

3) $a_1 \oplus a_3\ a_4\ a_5\ a_6\ a_7\ a_8\ б_1 \oplus б_3\ б_4\ б_5\ б_6\ б_7\ б_8\ в_1 \oplus в_3 \ldots$

Рис.12.4 Перемеження розрядів різних відліків

Символи кодових слів позначені літерами від *а* до *ж* з цифровими індексами, які визначають порядковий номер (місце) розряду в слові. Символи $з_1, з_2, \ldots, з_8$ – перевіркові.

Перед передачею (чи записом) порядок слідування символів в послідовності змінюється (наприклад, як це показано на рядку *2*). Спочатку передаються перші розряди всіх кодових слів, потім другі, потім треті і т.д. При прийомі (відтворенні) порядок слідування символів відновлюється (рядок *3*).

Припустимо, що при передачі чи зчитуванні виник пакет помилок в місцях із 7-го до 11-го (відмічено жирним шрифтом). При відсутності перемеження (рядок *1*) ці помилки спотворять поспіль символи **$а_7$ $а_8$ $б_1$ $б_2$ $б_3$ $б_4$ $б_5$**. Якщо ж пакет помилок виник у сигналу, який підданий перемеженню, то після деперемеження на приймальній стороні пакет помилок перетворився в сукупність одиничних помилок ⊕ (рядок *3*).

Завдяки перемеженню помилково відновлені відліки вже не слідують поспіль один за одним, рис.12.5.

На рисунку показано: *а* – без перемеження; *б* – з перемеженням (1 – початковий аналоговий сигнал; 2 – відліки дискретизованого сигналу; 3 – те ж, але 5-й, 6-й і 7-й відліки уражені завадою; 4 –прийняті чи відновлені відліки, штриховою лінією показані загублені відліки після відновлення, наприклад, шляхом інтерполяції).

Видно, що при відсутності перемеження відновити уражені 5-й, 6-й і 7-й відліки виявилося б набагато складніше.

Ефективність даного способу можна підвищити, якщо перемеження символів в межах одного блоку інформації доповнюється перемеженням самих блоків (як це прийнято, наприклад, в цифрових магнітофонах).

Виправлення пакетів помилок великої тривалості вимагає пристроїв з ємністю, що дозволяє запам’ятовувати більше число відліків. Збільшується довжина циклу передачі та час затримки сигналу в цих пристроях.

Розміщення цифрового звукового сигналу в канальних інтервалах циклу (цифрової системи передачі) зазвичай виконується ємністю в один октет. Для прикладу на рис.12.6 показано перемеження восьми 10 - розрядних відліків.

В першому октеті розміщені 1-й і 10-й розряди перших непарних відліків, у другому октеті – 2-й і 9 – й розряди тих же відліків і т.д.

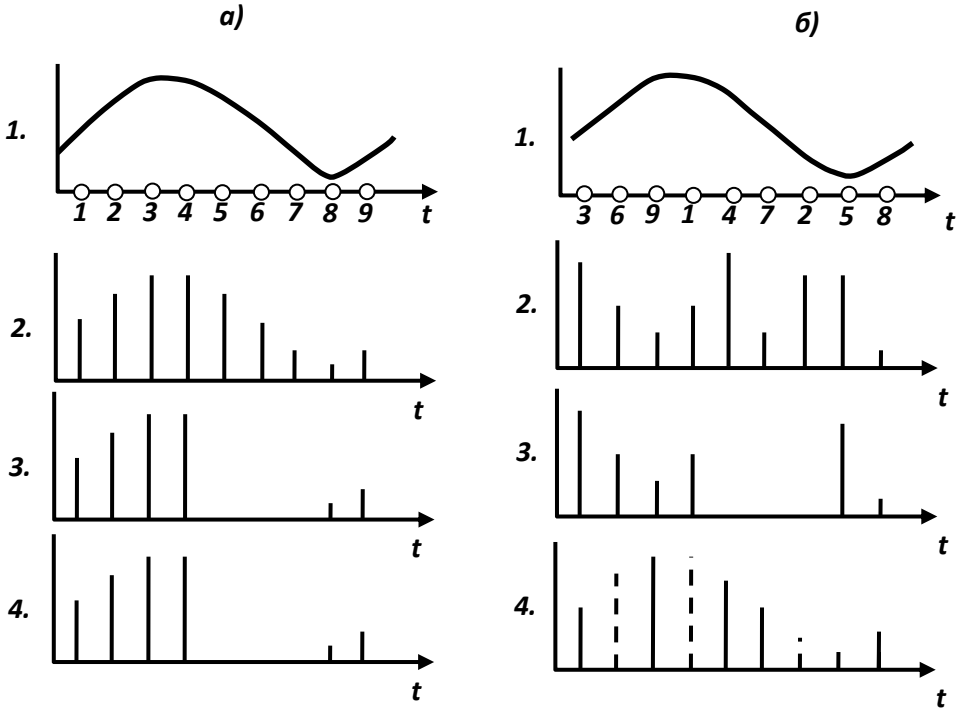


Рис.12.5 Щодо пояснення принципу перемеження відліків

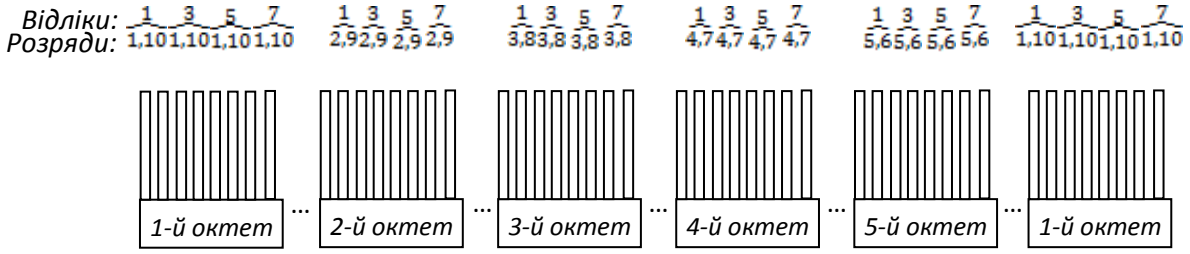


Рис.12.6 Перемеження старших і молодших розрядів у восьми 10 – розрядних відліках

Потім подібним же чином перемежуються розряди чотирьох парних відліків. Розподіл відліків на парні і непарні не призводить до одночасного спотворення сусідніх відліків, навіть при пакеті помилок тривалістю у вісім символів.

Для відновлення помилок спочатку вимагається виявити місце помилки. Для непідготованого читача нижче дається ілюстрація, як можна це зробити.

Найпростіші методи виявлення помилки. Найпростіший виявляючий код – *код з повторенням*. Наприклад, кожен інформаційний символ можна повторити *n* разів (зазвичай *n* непарне і більше двох)

$$"0" \to 000000000\ldots0$$

$$"1" \to 111111111\ldots1$$

Це (*n*, 1) – код. Якщо більшість прийнятих бітів співпадає з переданим інформаційним бітом, то приймається рішення за ознакою «більшості», тобто реєструється істинно переданий біт.

Якщо переваданий символ передавати лише двічі (*n*=2), то при виявленні помилки не можна зробити висновок про те, який із двох символів передано. Одиничну помилку можна виявити лише у випадку при передачі не менше трьох разів. Наприклад, якщо при передачі «1» у вигляді 111 і одній помилці (101 чи 011 чи 110) вже можна прийняти рішення про передачу «1». Подібний метод неефективний, оскільки вимагає збільшення пропускної здатності каналу передачі втричі.

Більш ефективним, але порівняно простим являється *код з перевіркою на парність*. До інформаційних бітів кожного кодового слова m – ої розрядності додається (m+1) – й біт так, щоби повне число одиниць (чи нулів) в кодовому слові було парним. Даний прийом використовується дуже часто (через простоту реалізації в цифровому пристрої). Додатковий біт називається бітом перевірки на парність (паритетним бітом).

Наприклад, для m=4

$$0000 \to 0000\ \mathbf{0}, 0001 \to 0001\ \mathbf{1}, 0010 \to 0010\ \mathbf{1}, 0011 \to 0011\ \mathbf{1}\ i\ т.д.$$

Це код (m+1, m). Якщо біт передається неправильно, то помилка виявляється (бо сума всіх одиниць не буде рівною цілому числу, при умові що помилка одинична). Позицію (місце в комбінації) ж помилки виявити неможливо. Код з перевіркою на парність не дозволяє виправляти помилки, він використовується лише для виявлення помилок, але не для їх виправлення (в

документальному зв'язку замість прийнятого символу друкується «зірочка», тобто помилка).

Маскування помилок. Якщо середня ймовірність появи помилки не перевищує $p_{пом}=10^{-5}$ (а джерелом помилок є шум в каналі передачі), то розрахунки показують, що одиничні помилки з'являються в середньому 2 рази на секунду, а подвійні – приблизно 4 рази на добу. Зрозуміло, що в подібних умовах достатньо враховувати тільки одиничні помилки. Дія останніх призводить до спотворення величини окремих відліків сигналу, і ефективним способом боротьби з ними є виявлення помилково прийнятих кодових слів з наступним маскуванням спотворених відліків.

Для виявлення зазвичай використовується код з перевіркою на парність (у варіанті парності числа переданих одиниць «1»). Ймовірність Ро того, що помилку в даному випадку *не буде виявлено*, залежить від ймовірності $p_{пом}$ її появи в каналі та від числа розрядів (символів) m в кодовому слові, включаючи розряд парності

$$Po=C_m^2\, p_{пом}^2,$$

де C_m^2 – число сполучень m символів по 2.

Видно, що використання довгих кодових слів веде до зростання ймовірності невиявленої помилки.

Якщо одинична помилка в кодовому слові виявлена, то її маскування після цього полягає в заміні спотвореного відліку. Звичайні прийоми для процесу маскування показані на рис.12.7.

На рис.12.7,а відмічено помилкові значення відліку (Un). Найневдалішим є його заміна на нуль, тобто викидання відліку з помилковим значенням (8.28.б). краще, якщо помилковий відлік буде замінений значення попереднього відліку (рис.12.7,в – екстраполяція нульового порядку). Ще ближче буде уражений відлік до істинного значення, якщо його значення отримано, як інтерполяція значень двох сусідніх відліків, наприклад, як середнє значення попереднього і наступного відліку (рис.12.7,г – інтерполяція першого порядку). Але, і в даному випадку різниця між відновленим і істинним значеннями відліку може перевищити крок квантування і виявитися помітною на слух.

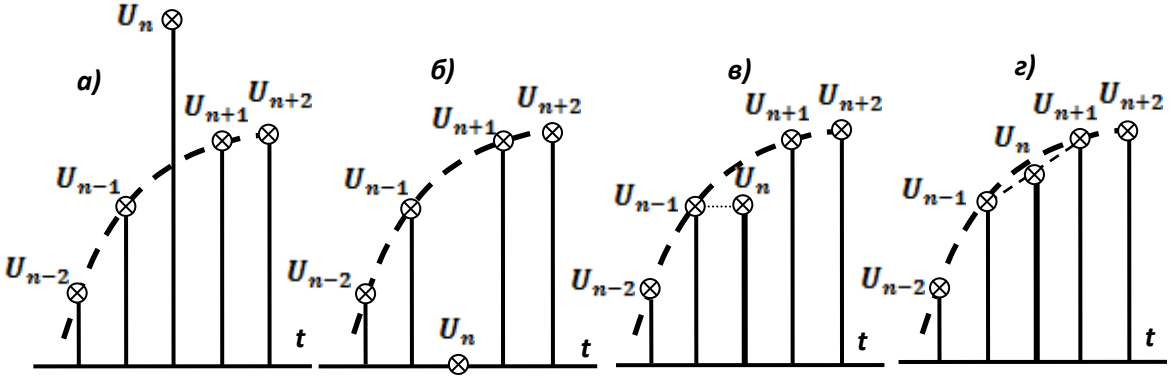


Рис.12.7 Маскування помилкових відліків

Оскільки слух людини інерційний, то метод маскування виявляється ефективним, якщо число помилок не перевищує однієї – двох на секунду. Це

виконується при ймовірності виникнення помилки в каналі $p_{пом}=10^{-5}$. При m=6 в цьому випадку ймовірність невиявленої помилки складе $Po=15*10^{-10}$.

Збільшення $p_{пом}$ до значення 10^{-4} веде до різкого зростання середнього числа помилок на секунду (до 20). Метод інтерполяції першого порядку не забезпечує повного маскування помилок корисним сигналом – помилки стають помітними на слух. Викладене дозволяє оцінити застосування розглянутого методу лише при $p_{пом}\leq 10^{-5}$. Якщо ймовірність помилки перевищує $p_{пом}=10^{-5}$, то утворюються пакети помилок і від їх маскування доводиться переходити до виправлення.

Виправлення помилок. Для виправлення помилок застосовується завадостійке кодування. Наприклад, при широко відомому блоково – лінійному кодуванні передавана послідовність символів розділяється на блоки, які містять однакову кількість символів. Загальне число символів (бітів) в кодовому слові рівне *m*, із них інформаційними являються перші *k* символів, а останні *m-k* символів – перевіркові.

Перевіркові символи формуються в результаті деяких лінійних операцій над інформаційними символами. Наприклад, перевіркові символи можуть являтися сумою за модулем 2 різних сполучень інформаційних символів. Чим більше перевіркових символів, тим краще коректуючі можливості коду.

Особливістю лінійного коду є те, що сума (і різниця) складових його кодових слів також є кодовим словом, яке належить цьому коду. Відношення числа перевіркових символів до їх загального числа (m-k)/m називається надлишковістю коректуючого коду. Найбільш відомим блоковим лінійним кодом являється код Хемінга. Зі зростанням кратності помилок об'єм необхідної додаткової інформації різко зростає. Так, для бітів аудіоданих потребується наступне число додаткових (перевіркових, контрольних) бітів в коді Хемінга, щоб помилка була не лише виявлена, але і виправлена, табл. 12.3.

Таблиця 12.3 Відповідність між кількістю бітів даних і перевіркових бітів у коді Хемінга для виправлення помилок

Число бітів даних	1-4	5-11	12-26	27-57	58-120
Число контрольних бітів	3	4	5	6	7

Викладене ще раз підкреслює важливість перетворення пакету помилок в одиничні методом перемеження.

Існує великий клас так званих *лінійних циклічних кодів* (*CRC - коди*). Циклічність формування кодових слів (з числа дозволених) дозволяє зменшити об'єм пам'яті пристроїв, які реалізують кодування та виправлення помилок, а можливість запису кодових слів у вигляді степенних поліномів зводить процедури кодування і декодування до операцій множення і ділення поліномів, які легко реалізуються технічно.

Наприклад, циклічний код *Боуза-Чоудхорі-Хоквингема* (*код БЧХ*), який використовується в системі супутникового радіомовлення дозволяє виправити дві чи три помилки, виявити та замаскувати п'ять чи чотири помилки на кожний кодовий блок з 63 символів. При ймовірності помилки $p_{пом}=10^{-3}$ це означає появу однієї невиявленої помилки на годину. Надлишковість такого коду складає (63-44)/63=0.33 (тобто 33%).

Приблизно такою ж збитковістю володіють циклічні коди Ріда – Соломона. Так, подвійний циклічний код Ріда – Соломона з перемеженням символів (CIRC - код) знайшов застосування для виправлення помилок великої кратності в системі звукозапису компакт – дисків і в цифровому магнітному записові.

В останні роки ширше стали використовуватися *згорткові коди*. В них опрацьовується неперервна послідовність символів без розділення на її незалежні блоки. Перевіркові біти в кожній групі із *k* символів згорткового коду визначаються не лише інформаційними символами групи, але і інформаційними символами попередніх груп.

Згорткові коди в поєднанні з подвійним кодом Ріда – Соломона, що доповнені перемеженням символів, пропонуються до використання в системі безпосереднього цифрового мовлення.

8.2 Передискретизація

Зчленування (з'єднання) цифрових пристроїв відбувається без ускладнень, якщо частоти дискретизації в пристроях комутації співпадають. В цьому випадку досить узгодити закони компандування в різних ланках тракту. Як правило, це реалізується на основі ІКМ – сигналу з рівномірним квантуванням (який зазвичай являється початковим для всіх АЦП). Якщо ж частоти дискретизації різних ланок не співпадають, то інтерфейс повинен містити додатковий блок передискретизації. Подібна задача виникає, наприклад, при організації стику апаратури тракту формування програм ($f_д$=48 кГц) з апаратурою тракту первинного розподілу програм ($f_д$=32 кГц) або при з'єднанні апаратури систем запису програм ($f_д$=44,1 кГц) з апаратурою тракту формування програм і каналів передачі.

Змінити частоту дискретизації можна двома способами – проміжним переходом до аналогової форми і безпосередньо шляхом перетворень в цифровому сигналі.

Перший спосіб передбачає перетворення в аналогову форму та його наступну дискретизацію з новою частотою, та кодування в новому форматі. При цьому способі початковий звуковий сигнал піддається квантуванню двічі, що супроводжується зростанням потужності шуму квантування (і, звісно, не є бажаним). Наприклад, при переході від тракту формування програм (де $f_д$=48 кГц і m=16) до трактів первинного і вторинного розподілу програм (де $f_д$=32 кГц і m=10) зменшення числа розрядів приводить до зростання шуму

квантування на 20 … 26 дБ. Власне ж передискретизація в цьому випадку не відображається на загальному відношенні сигнал/шум.

Якщо передискретизація виконується без перетворення цифрового сигналу в аналогову форму, то для отримання нової сукупності відліків використовується процедура інтерполяції. При цьому реалізація методу найбільш проста, якщо частоти дискретизації мають загальний кратний співмножник.

В якості прикладу покажемо перехід від частоти передискретизації $f_д$=48 кГц до нового значення $f_д$=32 кГц, рис.12.8.

Найменше значення частоти, кратне цим величинам, складає 96 кГц. Збільшення частоти дискретизації досягається тут інтерполяцією проміжних додаткових значень відліків, а зменшення частоти дискретизації – відкиданням зайвих значень. Оскільки 32 кГц = (48*2)/3, то процедура передискретизації полягає в наступному:

- спочатку виконується перетворення від $f_д$=48 кГц до $f_д$=96 кГц, для цього методом інтерполяції розраховуються додаткові значення відліків в середині тактового інтервалу (на рис.12.8,а – штрихові лінії); отримана в результаті цього сумарна послідовність відліків відповідає $f_д$=96 кГц;
- далі із цієї послідовності вибирається кожен третій відлік (рис. 8.23.б), що означає зниження частоти дискретизації в три рази по відношенню до $f_д$=96 кГц.

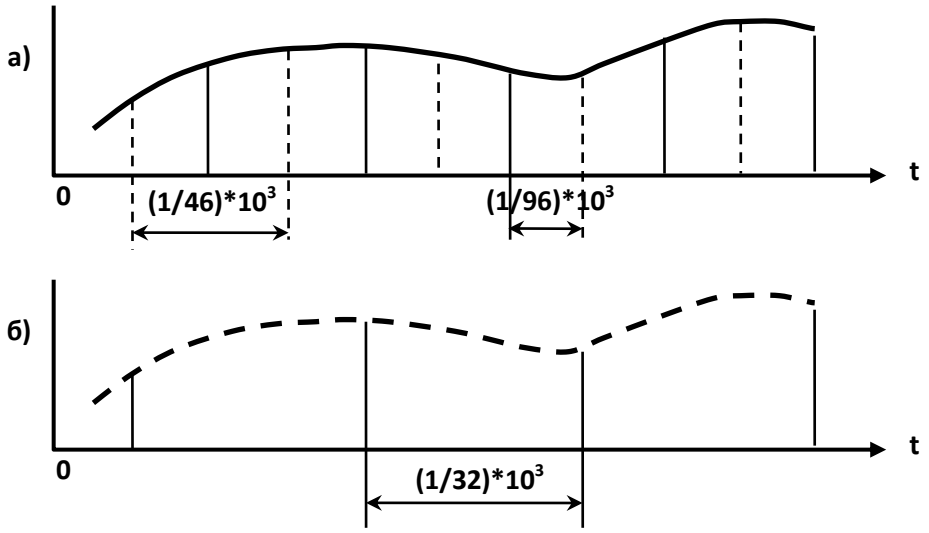


Рис.12.8 Щодо пояснення процесу передискретизації цифрового сигналу

Для наочності на рисунку показані не кодові слова, а відповідні їм відліки звукового сигналу.

Насправді ж інтерфейс оперує, виконуючи інтерполяцію з цифровими сигналами.

Здійснюючи передискретизацію, слід пам’ятати про можливість появи спотворень, створюваних «накладенням спектрів». Для усунення цього явища при зменшенні частоти дискретизації в інтерфейсі повинні включатися цифрові фільтри для обмеження смуги частот початкового звукового сигналу. Наприклад, необхідність такої додаткової фільтрації виникає при зменшенні $f_д$ від 48 кГц до 32 кГц, коли вимагається знизити смугу частот звукового сигналу

від 20 кГц (тракт формування програм) до 15 кГц (тракти первинного і вторинного розподілу програм).

Питання для самоконтролю

1. Аргументуйте доцільність та можливість скорочення статистичної надлишковості аудіоданих.
2. Аргументуйте доцільність та можливість скорочення надлишковості аудіоданих, обумовленого психоакустичними особливостями сприйняття програм мовлення.
3. Назвіть основні способи боротьби з помилками при передаванні цифрових мовних сигналів.
4. Аргументуйте необхідність передискретизації цифрових сигналів мовлення. Покажіть можливість її реалізації.

ДОДАТОК И. РИСУНКИ ДО ЛЕКЦІЇ №12

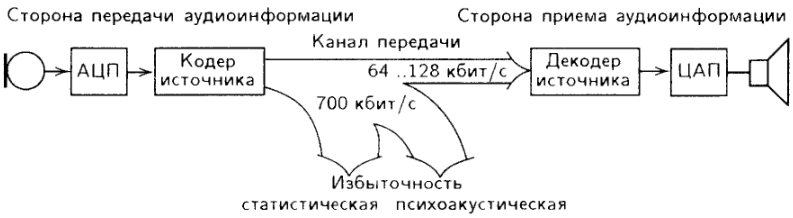


Рис. 12.24. К устранению избыточности цифровых звуковых сигналов

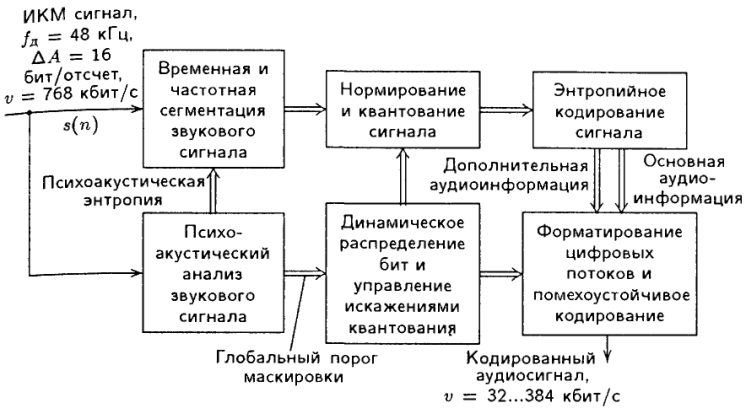


Рис. 12.25. Обобщенная структурная схема кодера с компрессией цифровых аудиоданных

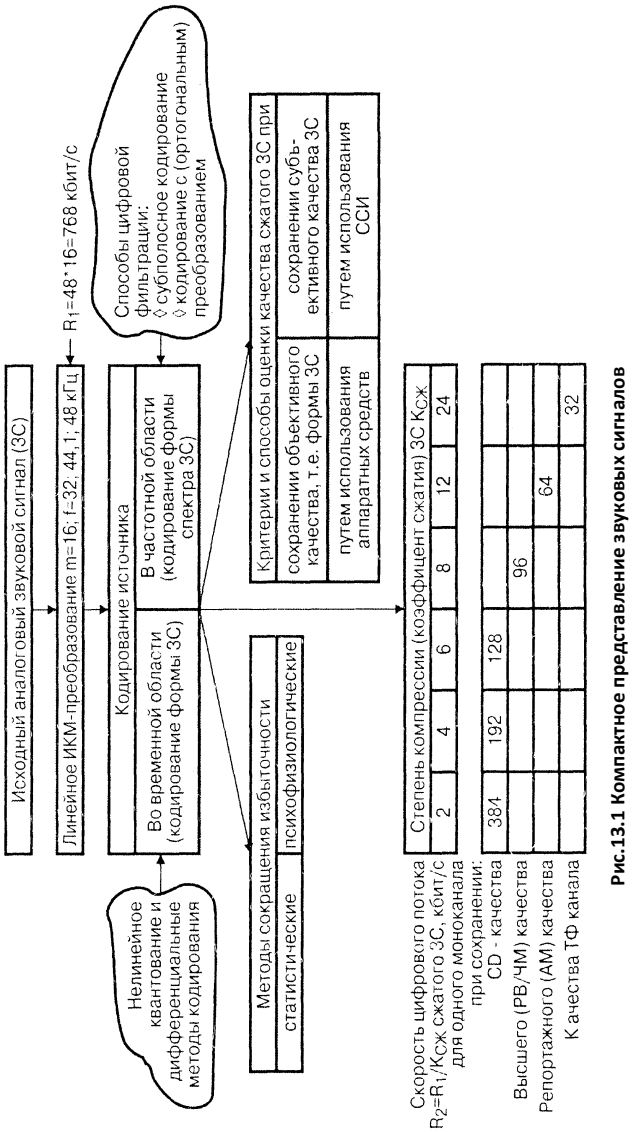


Рис.13.1 Компактное представление звуковых сигналов

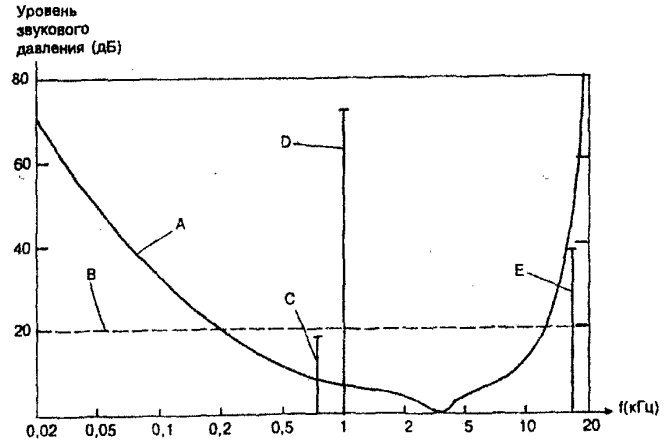
Рис. 13.3. Алгоритм кодирования аудиосигналов по ISO/IEC 11172-3 (MPEG–1, Layer II)

Таблица 8.3. Виды компрессии аудиоданных

Наименование алгоритма компрессии аудиоданных	Метод компрессии	Частота дискретизации, кГц	Число каналов передачи	Скорость передачи, кбит/с на канал	Величина компрессии	Области применения
ASPEC	Кодирование с преобразованием	32; 44,1; 48	1; 2	64 ... 192	1:6	ISDN
ATRAC	Субполосное кодирование с преобразованием	44,1	2	256	1:5	MiniDisk
MASCAM	Субполосное кодирование	48	1; 2	128 ... 256	1:4	DAB
MUSICAM	Субполосное кодирование	48	1; 2	128 ... 256	1:4	DAB
MPEG-1 (Layer 1 и 2)	Субполосное кодирование (MUSICAM)	32; 44,1; 48 (Layer 1только 48)	1; 2	Layer 1: 32 ... 448 Layer 2: 32 ... 384	1:4 (Layer 1) 1:6 (Layer 2)	DAB (Layer 2: 128 ... 258 кбит/с), DBS (Layer 2: 224 кбит/с), DCC (Layer 1: 384 кбит/с)
MPEG-1 (Layer 3)	Субполосное кодирование с преобразованием	32; 44,1; 48	1; 2	32 ... 320	1:9	Internet-вещание
MPEG-2	Субполосное кодирование с преобразованием	16; 22 ... ; 48	1 ... 5.1	32 ... 384	>1:9	Многоканальное стереофоническое вещание
MPEG-2 AAC	Субполосное кодирование с преобразованием	16; 22 ... ; 48	1 ... 5.1	16 ... 384	1:15	Многоканальное стереофоническое вещание
MPEG-4	Субполосное кодирование с преобразованием/ Параметрическое кодирование	16; 22 ... ; 48	1 ... 5.1	2 ... 64	-	Мультимедиа приложения
Dolby AC-3	Кодирование с преобразованием	44,1	1 ... 5.1	32 ... 384	1:13	Кинематограф, HDTV, спутниковое вещание
Гибридное	Субполосное кодирование с преобразованием/ Параметрическое кодирование	44,1	1; 2	32 ... 64	1: (15 ... 20)	Радиовещание, хранение информации

Таблица 4.5. **Взаимосвязь: качество звука – скорость цифрового потока**

Качество звука	Скорость цифрового потока на моноканал, R_1, кбит/с
Очень высокое (с запасом по обработке звукового сигнала), CD-качество	192/128
Субъективно отличное – для высококачественного радиовещания, CD-качество	128
Высокое, эквивалентное хорошему качеству ОВЧ ЧМ вещания	96
Среднее, эквивалентное хорошему качеству АМ радиовещания	48
Для передачи речи	32



A – абсолютная граница слышимости
B – уровень звукового давления шума

Рис.13.2 Примеры сигналов (C, D, E) различной интенсивности

Таблица 4.6. **Варианты реконфигурации мультиплексирования**

Вариант комбинации из N звуковых программ (стерео + моно)	Скорость цифрового потока, кбит/с		
	R_1 (стерео)	R_1 (моно)	$R_д$
4 (4 + 0)	4 × 256	--	144
6 (6 + 0)	6 × 192	--	16
6 (4 + 2)	1 × 256 + 3 × 192	1×128 + 1× 64	144
7 (4 + 3)	1 × 256 + 3 × 192	3 × 64	144
9 (9 + 0)	9 × 128	--	16
22 (0 + 22)	--	22 × 48	112
5 (5 + 0)	2 × 256 + 3 × 192	--	80
6 (6 + 0)	3 × 256 + 3 × 128	--	16
5 (5 + 0)	1 × 256 + 3 × 192	--	144

Таблица 4.3. **Основные характеристики кодирования источника**

Частота дискретизации, кГц	Звуковой режим	Скорости цифрового потока аудиоданных, $R_{зв}$, кбит/с	Длительность звукового фрейма, мс
48	Одноканальный (одна монопрограмма)	32,48,56,64,80,96, 112,128,160,192	24
	Стереофонический; двухканальный (два моноканала); объединенный стереофонический	64,96,112,128,160,1 92,224,256,320, 384	
24	Для всех режимов передачи	8,16,24,32,40,48, 56,64,80,96,112, 128,144,160	48

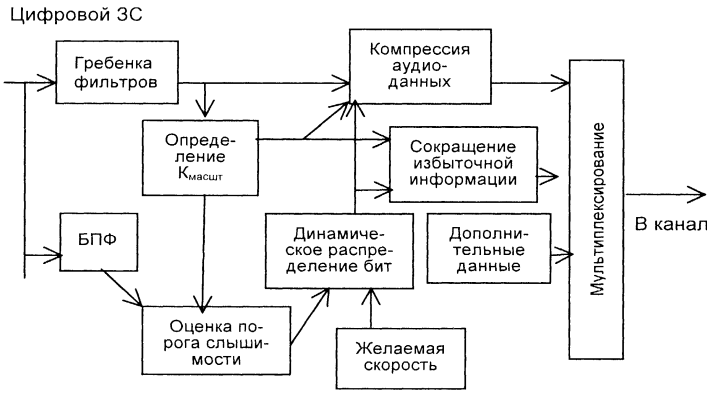


Рис.13.4 Структурная схема кодера MUSICAM

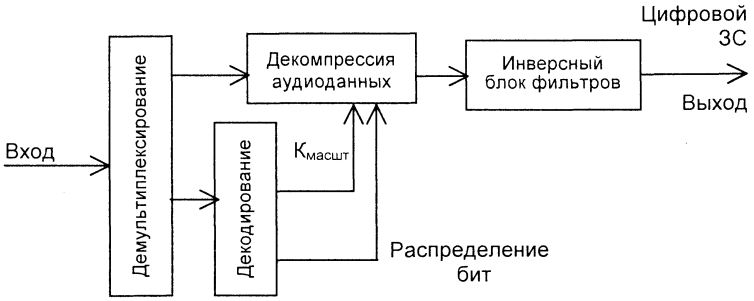


Рис.13.6. Схема декодера MUSICAM

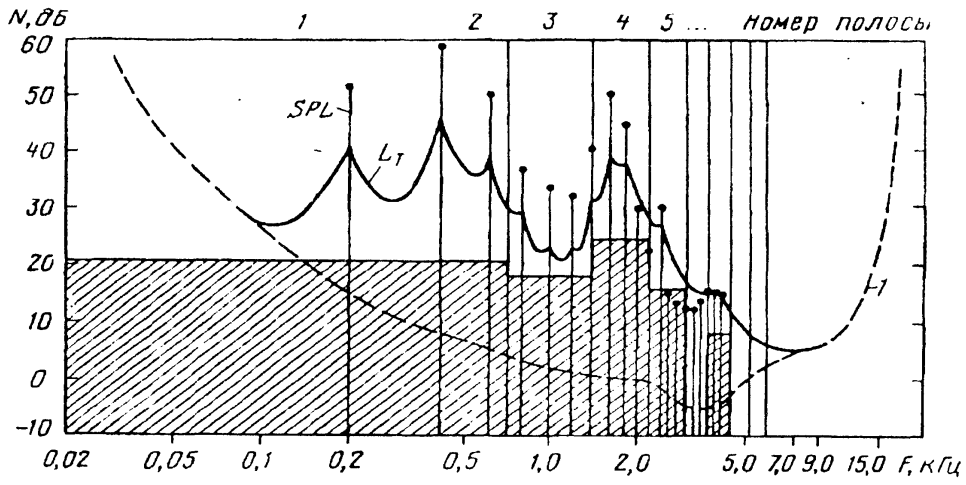


Рис.13.5 Иллюстрация процедуры частотного анализа звукового сигнала

Таблица 4.4. **Чувствительность к ошибкам разрядов звукового фрейма**

Параметр	Номер разряда	Чувствительность
Код распределения бит	Все разряды	5
Код выбора масштабных коэффициентов (ScFSI)	Все разряды	5
Масштабные коэффициенты (ScF)	5 (самый старший разряд)	4
	4	4
	3	4
	2	3
	1	2
	0 (самый младший)	1
Субполосные выборки	8–16 (самый старший)	3
	5–7	2
	3,4	1
	0–2 (самый младший)	0

Первичный ИКМ звуковой сигнал

1. Расчет энергетического спектра выборки звукового сигнала и его нормирование, дБ:

$$X(k) = 10\lg\left|\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} h(n)s(n)\exp(-jkn2\pi/N)\right|^2,$$

где $k = 0,1,\ldots,N/2$; $N = 1024$ или 512; $h(n) = \sqrt{8}/3 \cdot 0{,}5[1 - \cos(2\pi n/N)]$; нормирование к уровню 96 дБ

2. Вычисление энергии сигнала выборки в субполосах кодирования, дБ:

$$E_{sb}(n) = \max\{[X_{sb(n)}(k)]_{\max}; 20\lg[\mathrm{SCF}_{\max}(n)\cdot 32768) - 10]\},$$

или

$$E_{sb}(n) = \max[X_{sb}(n), 20\lg[\mathrm{SCF}_{\max}(n)\cdot 32768) - 10],$$

где $X_{sb}(n) = 10\lg\sum_{k\in n} 10^{X(k)/10}$, дБ

3. Выделение локальных максимумов спектра сигнала выборки:

$$X(k) > X(k-1) \text{ и } X(k) \geqslant X(k+1)$$

4. Формирование списка тональных компонент:

$X(k) - X(k+i) \geqslant 7$ дБ, обследуемая область частот $\Delta F(k+i)$, для Layer 2, дБ:

$$X_{\text{тк}}(k) = 10\lg\left[\sum_{i=-1}^{1} 10^{X(k+i)/10}\right].$$

Список тональных компонент $\{X_{\text{тк}}(k)\}_{tk}$

$$i = \begin{cases} -2,+2 & \text{для } 2 < k < 63; \\ -3,-2,+2,+3 & \text{для } 63 \leqslant k < 127; \\ -6,\ldots,-2,+2,\ldots,+6 & \text{для } 127 \leqslant k < 255; \\ -12,\ldots,-2,+2\ldots,+12 & \text{для } 256 \leqslant k < 500 \end{cases}$$

5. Формирование списка не тональных (шумоподобных) компонент:

1. Исключение из исходного спектра тональных и соседних с ними компонент.
2. Разделение оставшейся части спектра на критические полосы слуха
3. Расчет уровня энергии спектральных компонент в критических полосах слуха, дБ: $\{X_{\text{шк}}(k)\}_{nk}$, где $X_{\text{шк}}(k_1) = 10\lg\left[\sum_i 10^{0,1X(i)}\right]$, кроме $\forall X(i) \notin \{X_{\text{тк}}(k-1,k,k+1)\}$

6. Прореживание спектра тональных и нетональных компонент:

1. Исключение компонент, лежащих ниже абсолютного порога слышимости.
2. Прореживание тональных компонент с помощью окна шириной 0,5 Барк.
3. Исключение компонент, удовлетворяющих условию

$$X_{\text{тк,шк}}(i) = X_{\text{тк,шк}}(k), \quad X_{\text{тк,шк}}(k) = 0,$$

если $i = \begin{cases} k, & 1 \leqslant k \leqslant 48; \\ k + (k \bmod 2), & 49 \leqslant k \leqslant 96; \\ k + 3 - [(k-1) \bmod 4], & 97 \leqslant k \leqslant 232; \\ k + 3 - [(k-1) \bmod 8], & 233 \leqslant k \leqslant 512 \end{cases}$

7. Расчет коэффициентов маскировки и индивидуальных кривых маскировки для тональных и нетональных (шумоподобных) маскирующих компонент спектра сигнала выборки:

1. Коэффициенты маскировки тональных компонент, дБ:

$$K_{\text{м1}}[z(i)] = -0{,}275z(i) - 6{,}025.$$

2. Коэффициенты шумоподобных компонент, дБ:

$$K_{\text{м2}}[z(i)] = -0{,}175z(i) - 2{,}025.$$

3. Кривые индивидуальной маскировки, дБ, при $\Delta z(i,j) = z(i) - z(j)$, Барк:

$$M[z(i),z(j)] = \begin{cases} 17(\Delta z(i,j)+1) - \{0{,}4X([z(i)]+6\}, & -3 \leqslant \Delta z(i,j) < -1; \\ \{0{,}4X[z(i)]+6\}\Delta z(i,j), & -1 \leqslant \Delta z(i,j) < 0; \\ -17\Delta z(i,j), & 0 \leqslant \Delta z(i,j) < +1; \\ -(\Delta z(i,j)-1)\{17 - 0{,}15X[z(i)]\} - 17, & +1 \leqslant \Delta z(i,j) < +8 \end{cases}$$

8. Расчет порогов маскировки для тональных и шумоподобных компонент спектра сигнала выборки:

1. Тональные компоненты, дБ:

$$N_{\text{тк}}[z(i)] = X_{\text{тк}}[z(i)] + K_{\text{м1}}[z(i)] + M[z(i),z(j)].$$

2. Шумоподобные компоненты, дБ:

$$N_{\text{шк}}[z(i)] = X_{\text{шк}}[zi)] + K_{\text{м2}}[z(i)] + M[z(i),z(j)]$$

9. Расчет глобального порога маскировки и отношения сигнал-маска SMR в субполосе кодирования:

1. Расчет кривой глобального порога маскировки:

$$N_{\text{пм}}(i) = 10\lg\left[10^{N_{\text{абс}}[z(i)]/10} + \sum_{l=1}^{L} 10^{N_{\text{тк}}[z(i),z(j)]/10} + \sum_{p=1}^{M} 10^{N_{\text{шк}}[z(i),z(j)]/10}\right].$$

2. Расчет минимального порога маскировки в субполосе кодирования, дБ:

$$N_{\text{пм}}(n) = [N_{\text{пм}}(i)]_{\min}.$$

3. Расчет отношения сигнал-маска в субполосе кодирования n, дБ:

$$\mathrm{SMR}(n) = E_{sb}(n) - N_{\text{пм}}(n)$$

Значения $\mathrm{SMR}(n)$ в полосах кодирования n

Рис. 12.26. Последовательность вычислений в психоакустической модели 1 стандартов MPEG ISO/IEC 11172-3 и ISO/IEC 13818-3

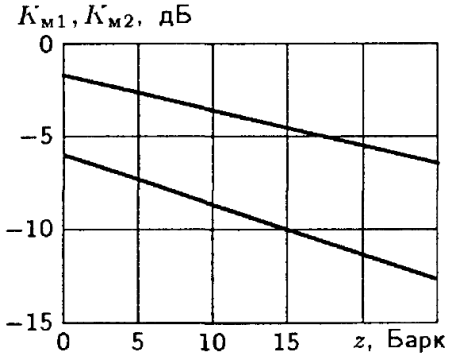


Рис. 12.27. Зависимость коэффициентов маскировки $K_{\text{м1}}$ и $K_{\text{м2}}$ от высоты тона z

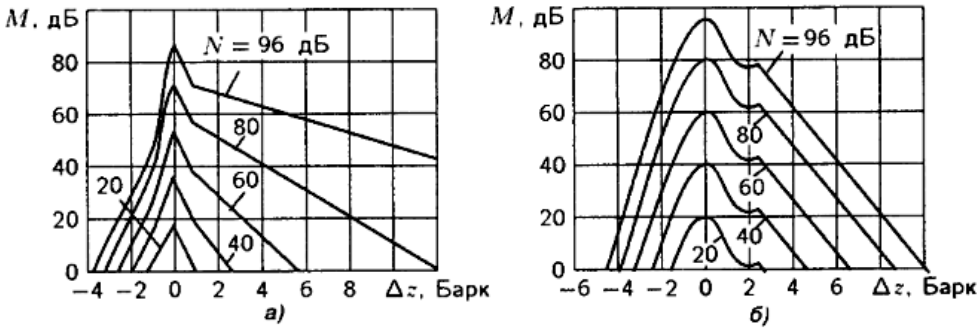


Рис. 12.28. Семейство кривых маскировки (развертывающих функций) для различных уровней маскирующего сигнала: *а* — психоакустическая модель 1 стандартов MPEG ISO/IEC 11172-3, 13818-3; *б* — психоакустическая модель 2 стандартов MPEG ISO/IEC 11172-3, 13818-3, 14496-3

Кодеры стандарта MPEG-1 ISO/IEC 11172-3

Рис. 12.42. Структурная схема кодера MPEG стандарта ISO/IEC 11172-3, Layer 1 и Layer 2

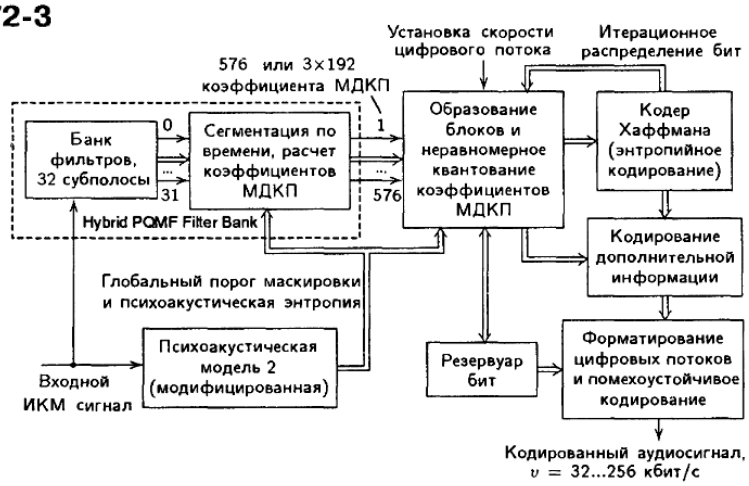


Рис. 12.43. Структурная схема кодера MPEG стандарта ISO/IEC 11172-3, Layer 3

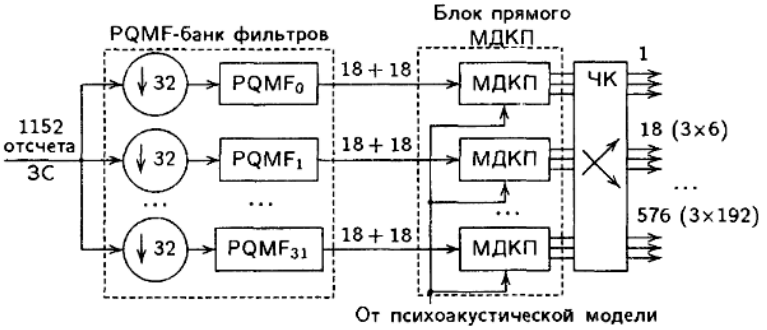


Рис. 12.44. Структурная схема гибридного банка фильтров кодера MPEG стандартов ISO/IEC 11172-3 или 13818-3, Layer 3

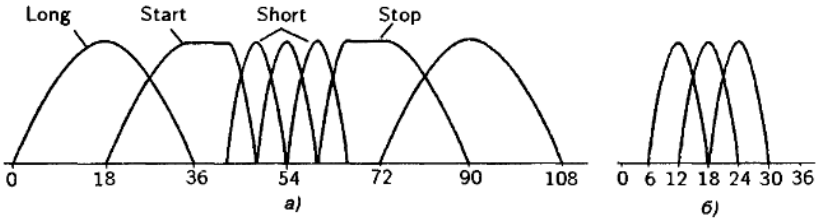


Рис. 12.45. Типы оконных функций, используемых в гибридном банке фильтров (*а*), и последовательность их переключения при наличии всплеска в сигнале выборки (*б*)

Таблица 12.1

Номер субполосы, n	Число ступеней квантователя	Индекс квантователя									Номер субполосы, n	Индекс квантователя								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11	12	13	14	15				
0–2	3	7	15	31	63	127	255	511	1023	2047	0–2	4095	8191	16383	32767	65535				
3–10	3	5	7	9	15	31	63	127	255	511	3–10	1023	2047	4095	8191	65535				
11–22	3	5	7	9	31	65536	–	–	–	–	11–22	–	–	–	–	–				
23–26	3	5	65535	–	–	–	–	–	–	–	23–26	–	–	–	–	–				

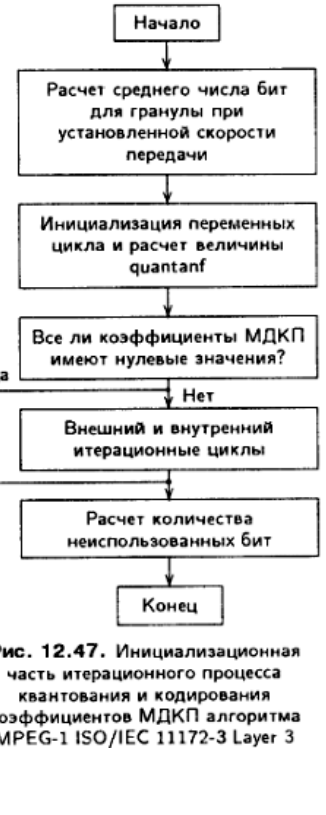
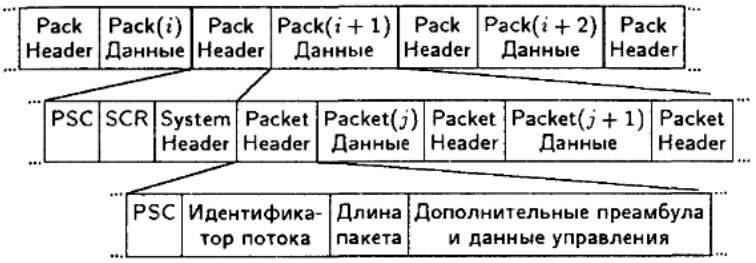


Рис. 12.47. Инициализационная часть итерационного процесса квантования и кодирования коэффициентов МДКП алгоритма MPEG-1 ISO/IEC 11172-3 Layer 3



а)

Header	CRC	BAL	SCF	Subband Samples	AD
12 бит синхрослово 20 бит информация о состоянии	16 бит	4 бита	6 бит →	Субполосные отсчеты, соответствующие 32 отсчетам ИКМ аудиосигнала	Дополнительные данные

б)

Header	CRC	BAL	SCFSI	SCF	Subband Samples	AD
12 бит синхрослово 20 бит информация о состоянии	16 бит	Нижние субполосы 4 бита Средние субполосы 3 бита Верхние субполосы 2 бита	2 бита 00 01 10 11	4 бита	$B(1)$ Блоки $B(12)$	Дополнительные данные

в)

Рис. 12.46. Структура цифрового сигнала при совместной передаче сигналов изображения и звука (*а*) и структура цифровых данных аудиофрейма в стандарте MPEG-1 ISO/IEC 11172-3: *б* — Layer 1; *в* — Layer 2

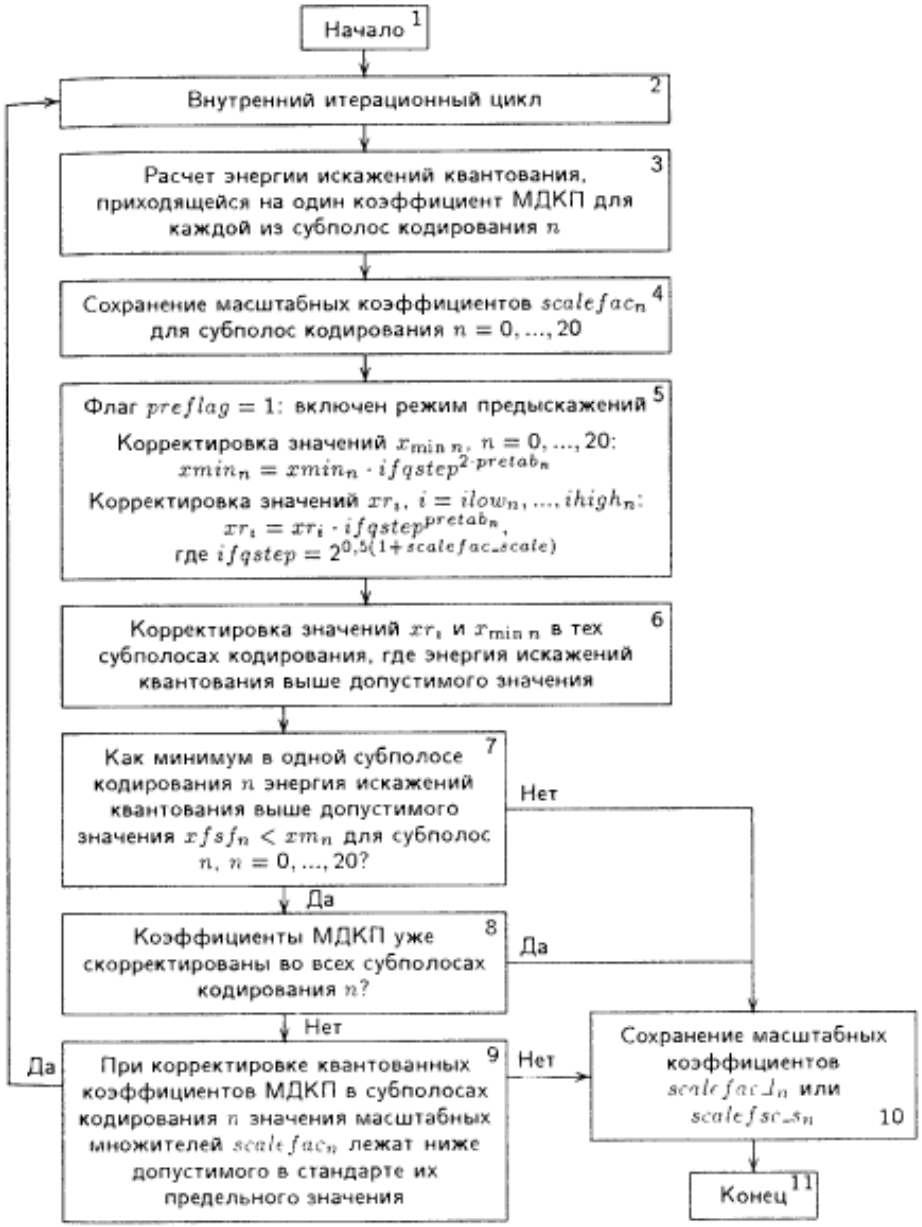


Рис. 12.49. Внешний итерационный цикл алгоритма Layer 3 стандарта MPEG-1 ISO/IEC 11172-3

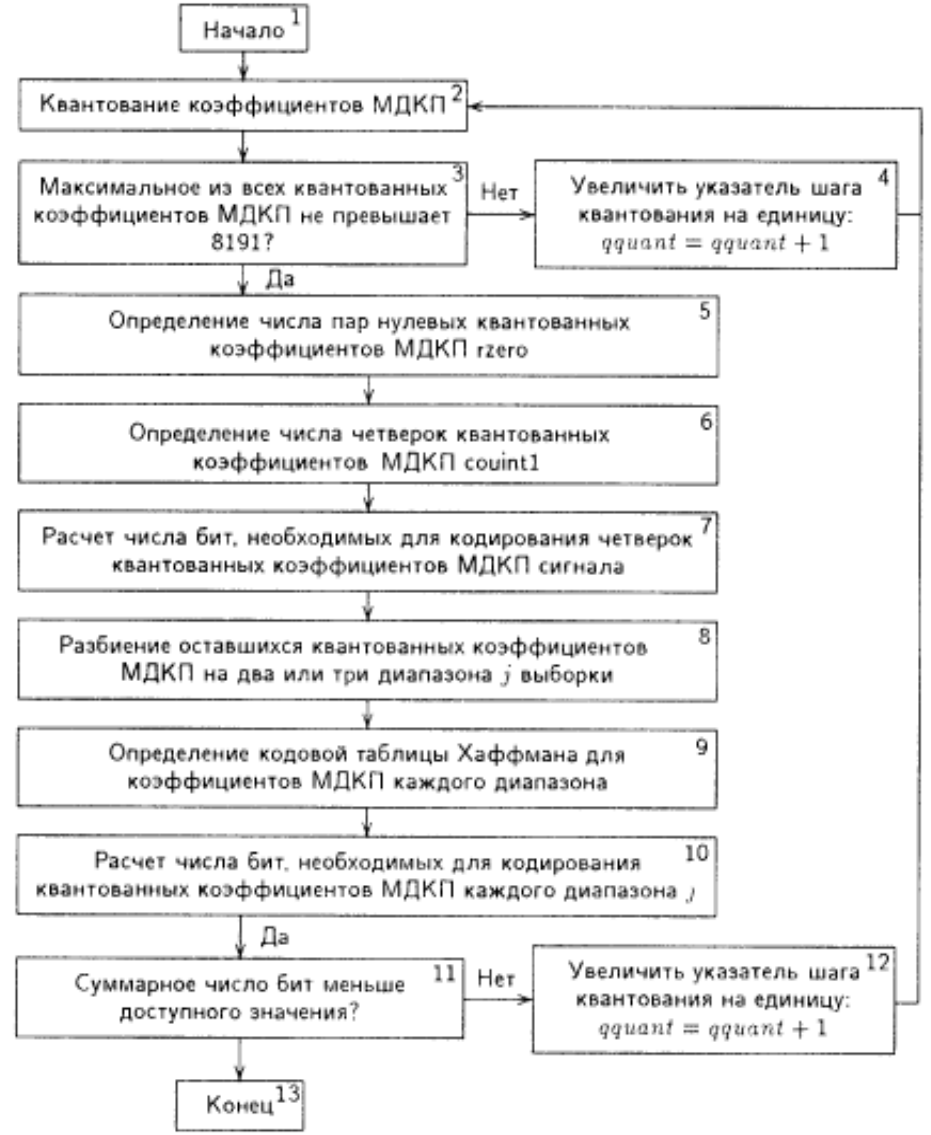


Рис. 12.48. Внутренний итерационный цикл алгоритма Layer 3 стандарта MPEG-1 ISO/IEC 11172-3

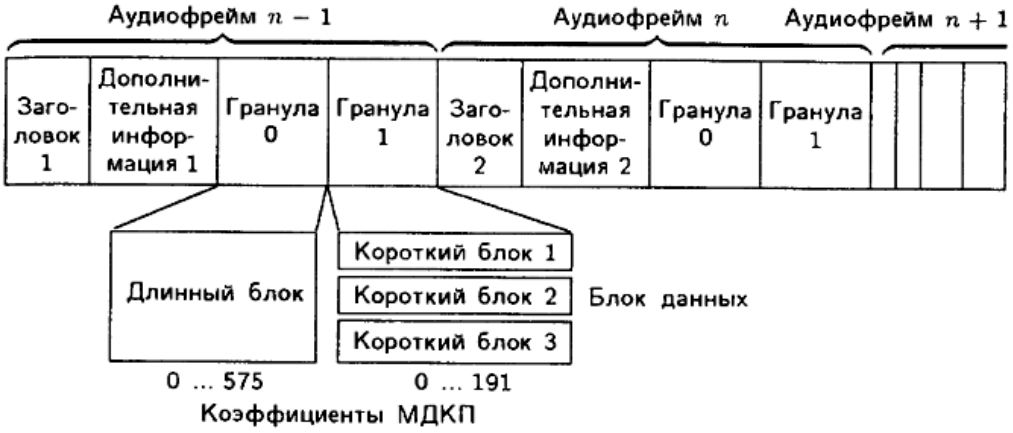


Рис. 12.50. Структура данных аудиофрейма стандарта MPEG-1 ISO/IEC 11172-3 Layer 3

Таблица 12.2
Сочетания передаваемых сигналов в стандарте MPEG-2 ISO/IEC 13818-3

Число каналов передачи	Конфигурация (формат воспроизведения)	Передаваемые сигналы
5	3/2	L, C, R, LS, RS
5	3/0+2/0	$L, C, R + L_2, R_2$
4	3/1	L, C, R, S (Surround)
4	2/0 + 2/0	$L, R + L_2, R_2$
3	3/0	L, C, R
3	2/1	L, R, S
2	2/0	L, R (Стерео)
1	1/0	Моно

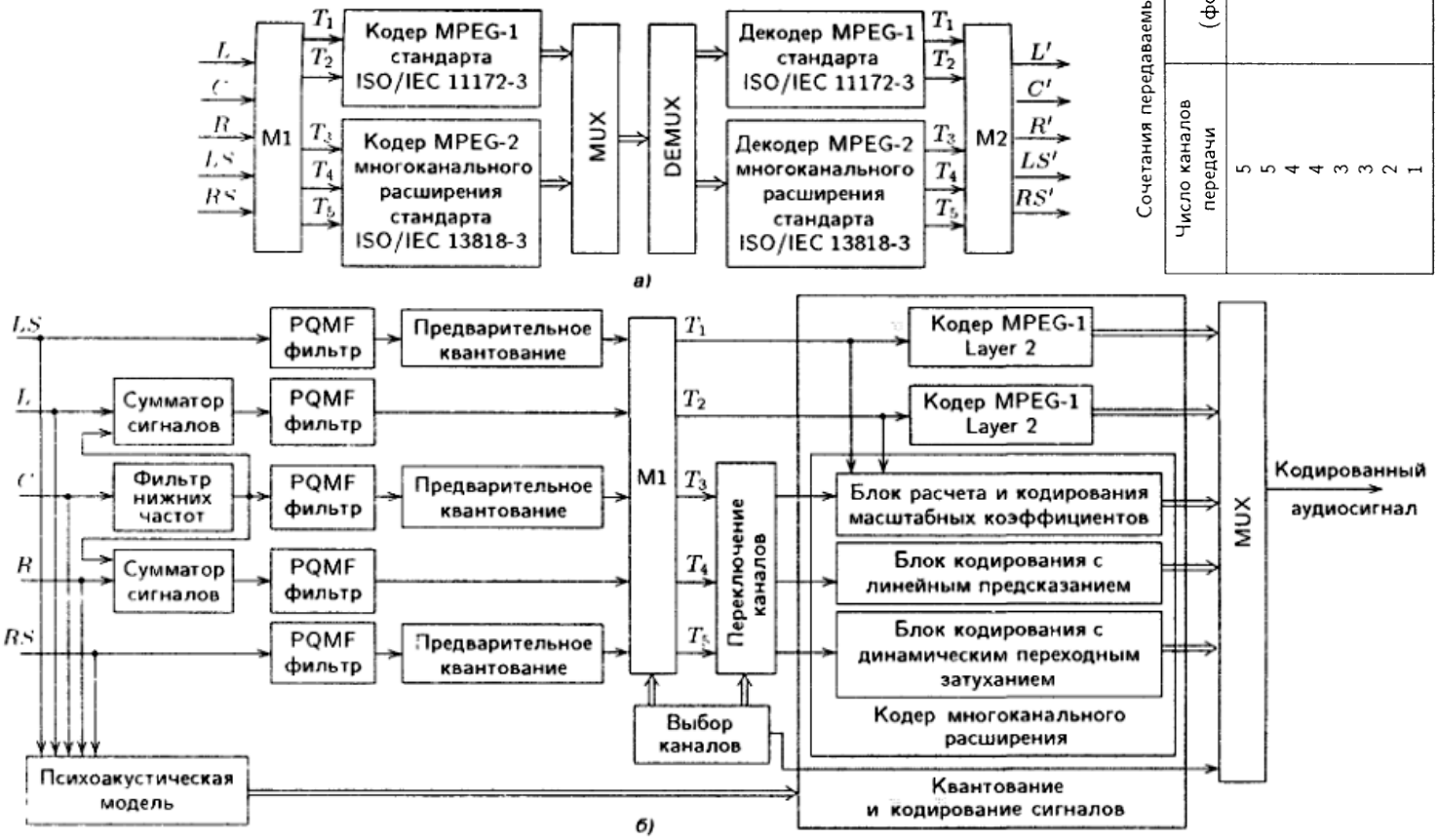


Рис. 12.51. Структурная схема кодека MPEG-2 стандарта ISO/IEC 13818-3 (многоканальная конфигурация) (*а*) и кодера MPEG-2 ISO/IEC 13818-3 Layer 2 (*б*)

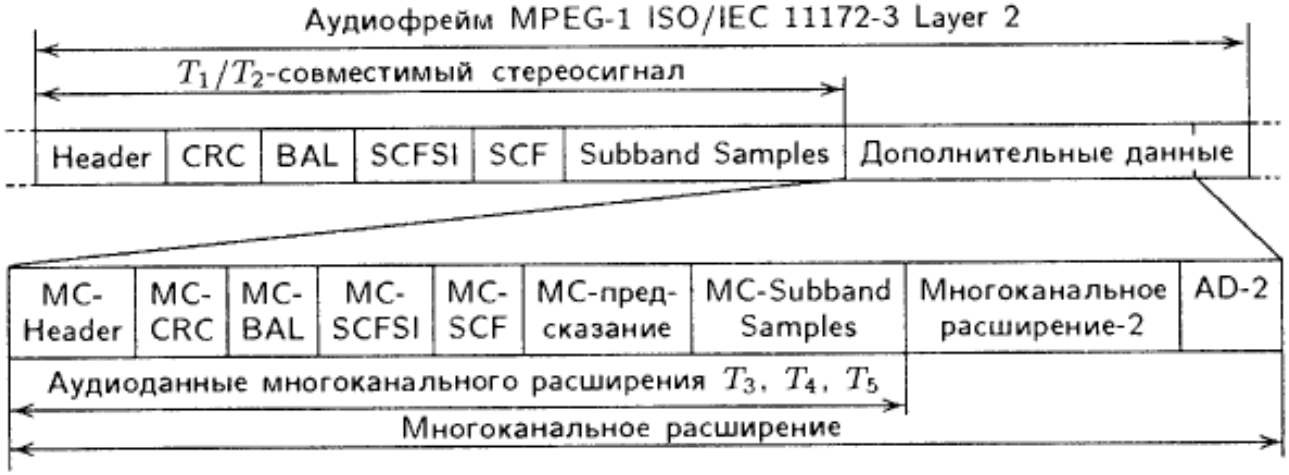


Рис. 12.52. Структура данных аудиофрейма MPEG-2 стандарта ISO/IEC13818-3 Layer 2 при отсутствии дополнительного расширения

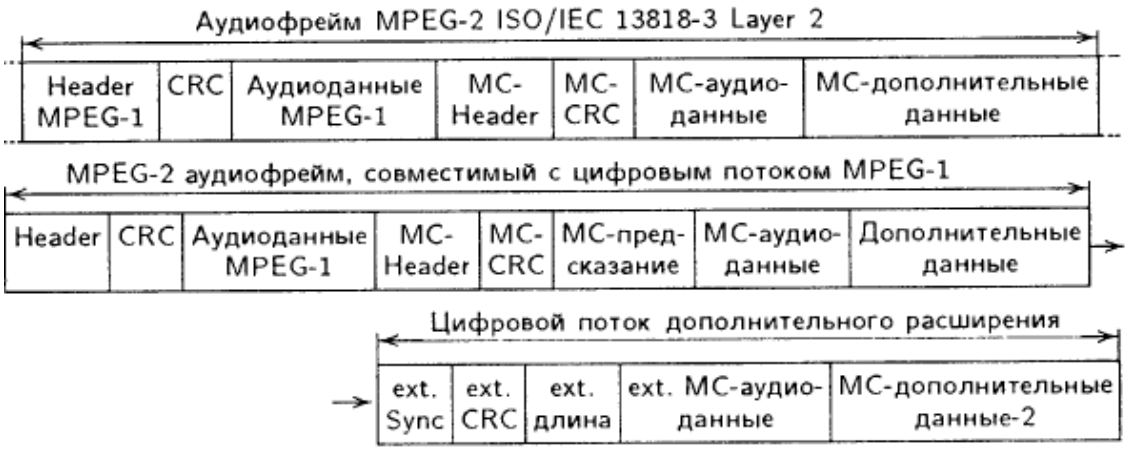


Рис. 12.53. Структура данных аудиофрейма MPEG-2 ISO/IEC 13818-3 с дополнительным расширением

Стандарт MPEG-2 ISO/IEC 13818-7 AAC

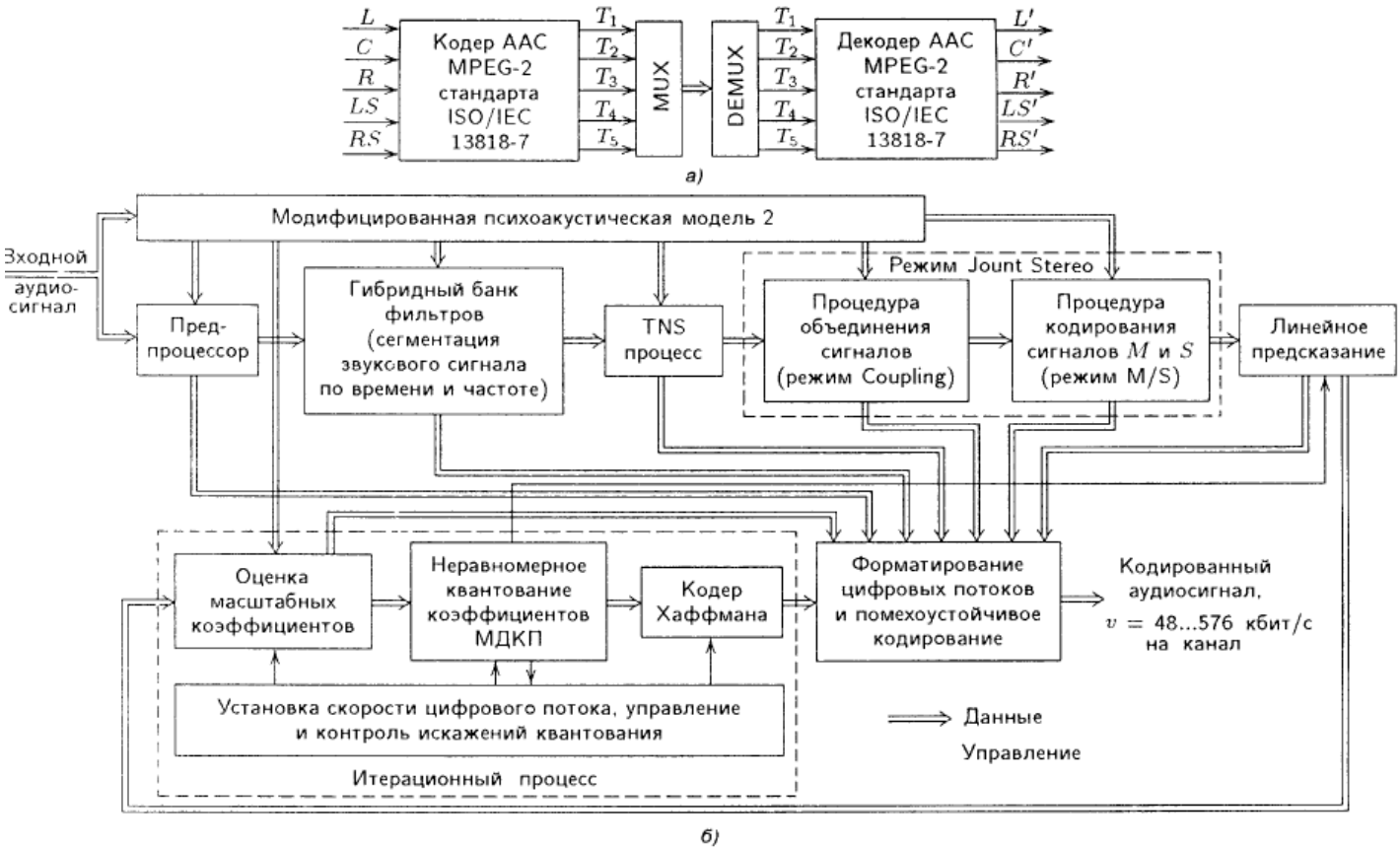


Рис. 12.54. Многоканальная конфигурация (*а*) и структурная схема кодера MPEG-2 AAC стандарта ISO/IEC 13818-7 (*б*)

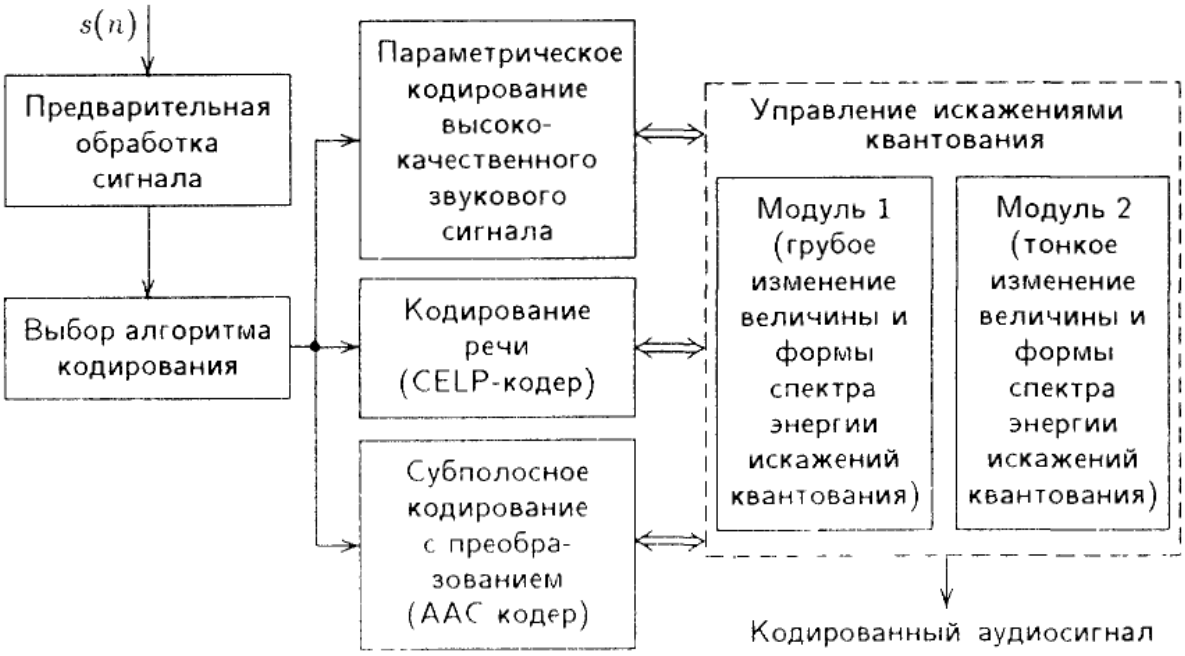


Рис. 12.55. Алгоритмы компрессии цифровых данных MPEG-4 стандарта ISO/IEC 14496-3

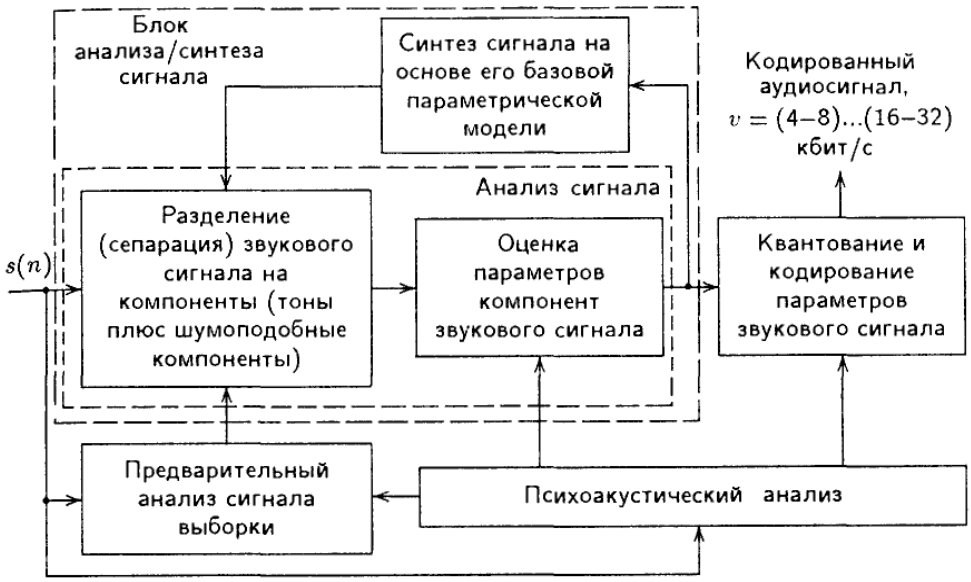


Рис. 12.56. Упрощенная структурная схема кодера, использующего метод параметрического кодирования звукового сигнала (стандарт MPEG-4 ISO/IEC 14496-3)

Таблица 12.3

Экспертные оценки качества кодеков с компрессией цифровых аудиоданных

Наименование алгоритма	Скорость передачи, кбит/с			
	96	128	160	192
MPEG-2 AAC	−1,15	−0,17	–	–
MPEG-1 Layer 3	–	−1,73	–	–
Dolby AC-3	–	−2,11	−1,04	−0,52
MPEG-1 Layer 2	–	−2,14	−1,75	−1,18

Градации оценки ухудшения качества звучания (5-балльная шкала оценки):
0 — незаметное;
−1 — заметное, но не раздражающее;
−2 — слегка раздражающее
−3 — раздражающее;
−4 — очень раздражающее.

ЛЕКЦІЯ №13 ОСНОВИ ЦИФРОВОГО РАДІОМОВЛЕННЯ

ЛІТЕРАТУРА:

1. Брагин А.С. Технологиивещательных служб. Часть 1. Технологии звукового радиовещания. –К.: НТУУ «КПИ», 2006.
2. Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов./Под ред. Ю. А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком., Радио и связь, 2007. – 872 с.

РОЗДАТНИЙ МАТЕРІАЛ: див. ДОДАТОК Ї

1. Різновидності цифрових систем ефірного радіомовлення

1.1 Загальні відомості

Завдяки передачі стереофонічних програм у діапазоні метрових хвиль рівень досягнутої якості звукового мовлення наближається до природного звуковідтворення. Однак, аналогові системи мовлення поступаються якості запису й відтворення звуку сучасної побутової звукової апаратури.

Системи радіомовлення споконвічно створювалися для прийому в стаціонарних умовах за допомогою спрямованої (на радіостанцію мовлення) антени, установленої на висоті дахів, і не передбачали можливість мобільного прийому. У наш час є величезне число абонентів, що використовують переносні малогабаритні й автомобільні приймачі. Умови прийому в русі (на ненаправлену антену, що вловлює радіохвилі не тільки з напрямку на радіостанцію), як правило, істотно гірше в порівнянні із прийомом на стаціонарну антену. Проблеми багатопроменевого (багатошляхового) прийому особливо загострені в умовах високої міської забудови.

Можливість якісного прийому програм мовлення в автомобілі, що рухається, принципово змінює положення в порівнянні зі стаціонарним радіоприймачем у будь-якому діапазоні хвиль, тому що припускає використання методів боротьби із завмираннями не тільки в діапазоні декаметрових, але й метрових радіохвиль. Через багатопроменеве поширення радіохвиль і в метровому діапазоні неможливий повноцінний прийом стереофонічних програм аналогового мовлення в автомобілі.

Число джерел цифрових програм, доступних слухачеві в дорозі, неухильно росте. На зміну аналоговій пластинці й аналоговому магнітофону прийшли цифрові джерела, найпоширенішим з яких є компакт-диск (CD).

Поки радіостанції використовують аналогове радіомовлення, навіть якщо джерелом програми є CD-програвач, цифровий магнітофон або (що нерідко зустрічається на комерційних радіостанціях) комп'ютер з банком музикальних записів у стандарті MPEG. Перед передачею «в ефір» цифровий сигнал перетворюється у звичайний аналоговий і радіопередавач залишається «останнім бастіоном аналогового звуку» з його обмеженою якістю.

Оскільки стійка звичка до якісного звучання на рівні компакт-диску, що стає загальноприйнятим стандартом, уже з'явилася, то єдиним рішенням, що

дозволяє істотно підвищити можливості радіомовлення, є впровадження цифрової техніки. Крім того, загальна тенденція розвитку інформатизації суспільства вимагає при розгляді концепції радіомовлення враховувати його **як один з видів систем мультимедіа** й, отже, приймати універсальні технічні рішення.

Як можливе рішення завдання якісного мобільного радіомовлення є перехід до цифрових стандартів передачі програм мовлення.

В основу технологій цифрового радіомовлення покладені подання й передача звукового сигналу в цифровій формі у всіх ланках тракту мовлення від студії до мобільного радіоприймача. Воно одержало популярність в 1995 р., коли було почато дослідне мовлення в діапазоні вище 30 МГц у Великобританії й у Скандинавських країнах у стандарті T-DAB. Цей стандарт радіомовлення гарантує прийом в автомобілі, що рухається, до 6 стереофонічних програм з якістю, близьким до якості CD - програвача, і з більшим обсягом додаткової інформації (перехід до мультимедіа).

Система рекомендована ITU (МСЭ-Р) для впровадження в усьому світі як наземна система цифрового звукового радіомовлення. Відзначимо, що даний стандарт - не єдиний.

1.2 Різновиди цифрових систем ефірного радіомовлення

Класифікують наступні цифрові системи ефірного радіомовлення з можливістю прийому як на стаціонарні, так і на мобільні цифрові радіоприймачі:

- *системи наземного цифрового радіомовлення* у двох варіантах - для роботи на частотах нижче 30 МГц і на частотах вище 30 МГц (у діапазонах метрових і дециметрових хвиль, приблизно до 1,5 ГГц);
- *системи безпосереднього* (тобто прямого супутникового) *цифрового радіомовлення* із прийомом сигналу мовлення побутовим радіоприймачем слухача (НЦРВ);
- *комбіновані системи цифрового радіомовлення, що* містять технічні засоби згаданих вище систем.

В останньому випадку система може бути реалізована як *гібридна наземно-супутникова система* (НСС), у якій для збільшення території обслуговування використовуються малопотужні розподільні мережі.

Самі загальні відомості про деякі системи цифрового радіомовлення містить табл. 13.1.

З метою проведення порівняльного аналізу технічних можливостей і характеристик різних систем цифрового радіомовлення в 1995-1996 гг. у США під егідою Асоціації електронної промисловості були проведені лабораторні й польові випробування систем (зазначених в 2-й, 3-й і 4-й рядках). На підставі проведених випробувань експертна комісія зробила висновок про те, що тільки система «Eureka 147/DAB» забезпечує ті параметри якості звучання й стійкості прийому сигналів, які радіослухачі очікують від нової системи. Ця система не

має гідних конкурентів, одержала широке визнання й впроваджується не тільки в європейських, але й у багатьох інших країнах миру. Для функціонування цієї системи потрібне виділення в діапазоні частот від 30 МГц до 3 Гц смуги частот шириною не менш 1,54 Мгц на один комплексний (з декількох програм мовлення) сигнал цифрового радіомовлення (так званий «DAB блок» або «ансамбль»), що може містити одночасно, наприклад, шість високоякісних стереофонічних програм і різну додаткову інформацію.

Таблиця 13.1. Загальні відомості про системи цифрового радіомовлення

Найменування системи	Варіант			Діапазон частот	Можливість прийому в русі
	наземна	НЦРВ	НСС		
DRM	+	-	-	НЧ, СЧ, ВЧ	гарантована
AM IBOC DSB	+	-	-	СЧ	гарантована
T-DAB	+	-	-	ОВЧ+УВЧ	гарантована
IBAC і IBOC	+	-	-	ОВЧ	обмежена
S-DAB (MediaStar)	-	+	+	УВЧ	обмежена
World Space	-	+	-	УВЧ	обмежена
Sirius Satellite Radio	-	+	+	УВЧ	відсутня
XM Satellite Radio	-	+	+	УВЧ	відсутня
DSR	-	+	-	СВЧ	відсутня
ADR	-	+	-	СВЧ	відсутня
Digital System E	-	+	+	УВЧ	відсутня

Відповідно до концепції цифрового мовлення користувачеві надається можливість додаткового прийому (одночасно із прийомом віщальної програми) буквено-цифровий і/або графічної інформації, включаючи рекламну, довідкову, комерційну (у тому числі - конфіденційну). При цьому канал передачі додаткових даних може бути не один.

Додаткова інформація може виводитися на рідкокристалічний дисплей приймача, а при необхідності й на зовнішній пристрій (наприклад, персональний комп'ютер).

Текстова інформація може призначатися для ідентифікації жанрів прийнятих програм і коментарів до музичних добутків, що виконуються, надавати інформацію про стан на дорогах, погоді, про критичні ситуації, а також бути пейджинговою інформацією або бути послугою «оплачуваного радіо» (оплачена можливість прослуховувати певні радіопередачі) і т.д. і т.п. Так, бажана для прослуховування програма (для безпошукового настроювання приймача) вибирається з назв станцій або радіопередач, показаних дисплеєм приймача. Ця інформація «попадає» на дисплей по каналах додаткової інформації. У майбутньому можлива реалізація ряду принципово нових споживчих послуг:

- визначення точного географічного місця розташування (за допомогою систем глобального позиціонування),
- прийом сигналів майбутньої інтегральної багатофункціональної служби цифрового радіомовлення (ISDB), що передбачає прийом і передачу комп'ютерних даних, факсимільних повідомлень і ін.

Таким чином, система цифрового радіомовлення стає інтелектуальним комунікаційним пристроєм, що пропонує набагато більше зручностей і послуг, чим здатна забезпечити традиційна аналогова технологія радіомовлення.

Варіант архітектури гібридної системи представлений на рис.13.1.

Функціонування може відбуватися, наприклад, у такий спосіб. Кілька звукових програм, сформованих різним студіями, поєднуються в єдиний цифровий потік на вході модулятор передавальної станції *2*.

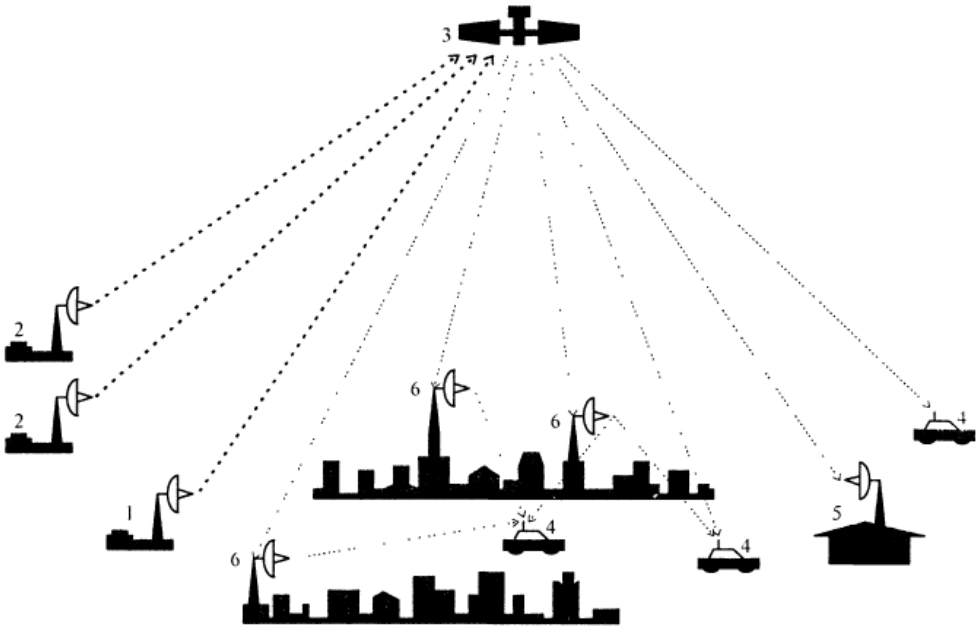


Рис. 13.1. Варіант архітектури гібридної системи цифрового радіомовлення

Сформований банк програм мовлення транслюється на бортовий ретранслятор 3.

На ретрансляторі після демодуляці можливе демультиплексування єдиного цифрового потоку з метою формування локальних наборів (пакетів) звукових програм із загального банку програм для конкретної зони мовлення (відповідно до команд, що надходять із центра керування системою мовлення - 1).

Сформований локальний цифровий потік далі надходить на модулятор бортового ретранслятора, а модульований радіосигнал випромінюється антенною системою (як варіант - багатопроменевої) убік Землі.

Прийом пакета програм на Землі може відбуватися безпосередньо стаціонарними (5) або рухомими (4) приймачам індивідуальних (або колективних) користувачів або наземною системою розподілу віщальних програм шляхом перевипромінювання через антени (6).

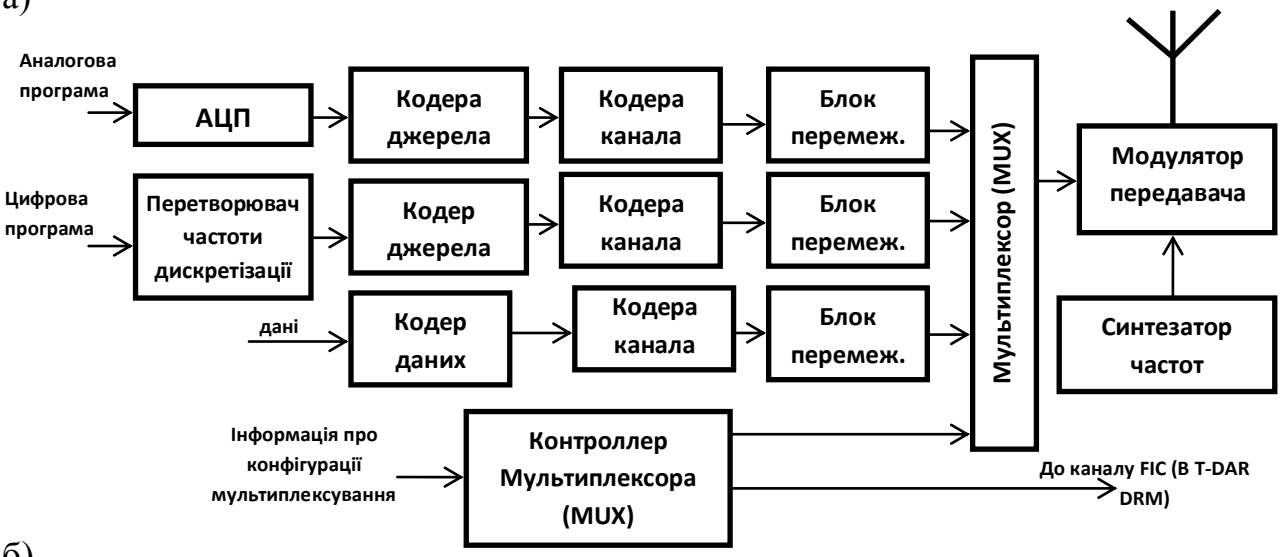
Незважаючи на розмаїтість можливих варіантів побудови систем цифрового мовлення (супутникові, наземні, кабельні), можна виділити типову структуру трактів формування, передачі й прийому сигналів звукового мовлення.

2. Тракти формування та приймання сигналів цифрового радіомовлення

Тракти формування й прийому сигналів цифрового мовлення показані в узагальненому виді на рис.13.2.

Сигнали звукового мовлення, що надходять у тракт формування (рис.13.2,а) в аналоговому виді, піддаються аналого-цифровому перетворенню (АЦП).

а)



б)

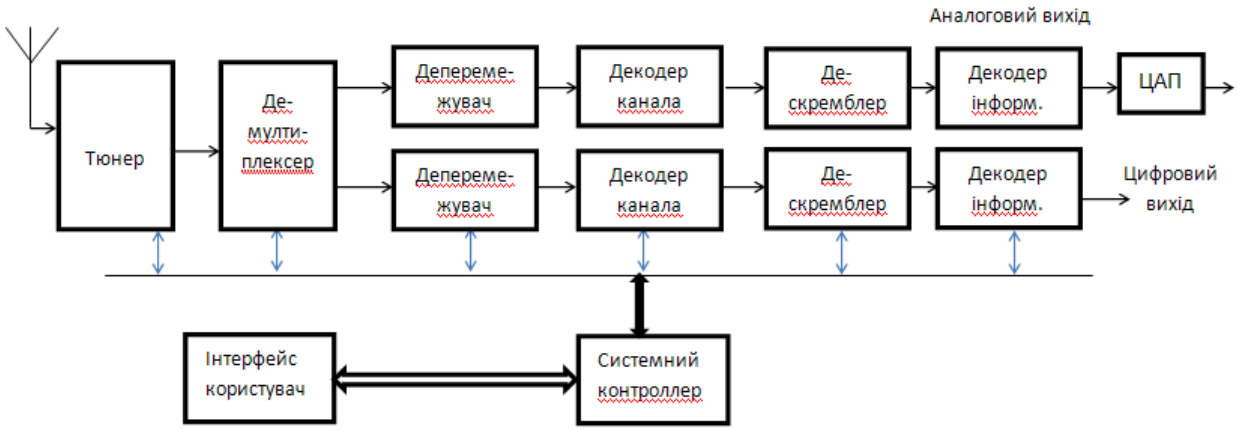


Рис.13.2. Тракти формування (а) і прийому (б) сигналів цифрового вішання

Сигнали звукового мовлення в цифровій формі звичайно мають частоту дискретизації 48 (стандартна частота для студійної цифрової апаратури при підготовці віщальної програми) або 44,1 кГц (звичайна частота фонограм CD). В останньому випадку потрібен перетворювач частоти дискретизації до значення, прийнятому в конкретному варіанті побудови системи (наприклад, 32 кГц).

Далі сигнали мовлення й додаткових даних піддаються індивідуальному кодуванню в кодерах джерела й кодерах даних.

У сучасних кодерах, як правило, використовуються кодеки джерела з усуненням надмірності сигналу мовлення (наприклад, система MUSICAM), що

забезпечують істотний стиснення інформації при збереженні високої суб'єктивної якості передачі звуку.

Наступним етапом обробки компактно представлених сигналів звукових програм і даних є їхнє канальне перетворення за допомогою кодерів каналу й блоків тимчасового переміжения для підвищення завадостійкості при проходженні по трактах розподілу віщальних програм.

Часто перед кодером каналу передбачається процедура скремблювання (рандомізації) для перетворення цифрового сигналу у квазівипадковий (що володіє більше рівномірним енергетичним спектром випромінюваного радіосигналу), чим полегшується рішення завдання синхронізації процесів у системі обробки цифрових сигналів на прийомному кінці тракту. Місце дескремблера показане на рис. 13.2,б.

Часове перемеження (разом з деперемеженням на прийомному кінці каналу мовлення) широко використовується для перетворення пакетів помилок великої кратності (причиною появи яких можуть виступати завмирання сигналів у середовищі поширення радіохвиль) в одиночні.

Третій етап обробки зводиться до того, що окремі цифрові потоки звукових програм і даних піддаються мультиплексуванню, а також системної організації й керуванню. Наприклад, щоб забезпечити синхронізацію приймача, парціальні цифрові потоки (що надходять на головний мультиплексор MUX) збираються в цикли певної тривалості (фрейми) з певною послідовністю складових частин. Кожній переданій звуковій програмі або інформації в каналі даних відповідає свій часовий інтервал у фреймі. Роботою мультиплексора управляє контролер MUX, причому режим мультиплексування може при необхідності змінюватися відповідно до заданої програми. У системах Т-**DAB** і **DRM,** щоб забезпечити мінімальну затримку доступу до переданих сигналів при їхньому прийомі, точна інформація про поточний момент мультиплексування (наприклад, дані для вибору необхідної програми) передається по каналі швидкої інформації (FIC). У цьому каналі дані не піддаються перемеженню й тому не перетерплюють тимчасової затримки.

Цифровий потік від мультиплексора надходить на вхід модулятора мовного радіопередавача. Після модулятора сформований клас випромінювання переноситься (за допомогою синтезатора частот) у заданий діапазон робочих частот і далі в тракт посилення (до необхідної потужності) передавача. У системах НЦРВ, як правило використовується диференціальна (відносна) квадратурна фазова маніпуляція (ОФМ-4). Тому до маніпуляції передбачається процедура перекодування цифрового потоку; без цієї процедури формувалися б випромінювання звичайної фазової маніпуляції (з відомим неприємним ефектом «зворотної роботи»). У перспективних системах, що передбачають COFDM, модем COFDM включається між виходом мультиплексора MUX і модулятором радіопередавача (на рис.13.2 не показано).

У тракті прийому сигналів цифрового мовлення (рис.13.2,б) виконуються операції, зворотні тим, що виконувалися в тракті передачі (рис.13.2,а). Приймач забезпечує декодування більш ніж одного канального компонента

багатопрограмного групового потоку (наприклад, звукової програми паралельно із сервісною інформацією).

Системний контролер приймача взаємодіє з інтерфейсом користувача й управляє приймачем відповідно до команд користувача й інформацією, що супроводжує передачі звукових програм, або вступника по каналі FIC (у системах T-DAB **і DRM).**

Таким чином, залежно від варіанта побудови системи використовуваного діапазону частот і кількості переданих в одному блоці звукових програм можуть мінятися методи перетворення кодування й модуляції сигналів.

3. Формування сигналів передачі радіомовлення за технологією COFDM

Якщо аудіодані різних програм у загальному (сумарному) потоці передаються послідовно один за одним, то говорять про часовий поділ каналів (ВРК). Весь цифровий потік передається на єдиній несучій частоті з використанням прийнятого виду маніпуляції (наприклад, відносної фазової, ФМ). У супутникових системах такий метод передачі одержав абревіатуру ВРК-ИКМ-ФМ. Достоїнствами подібної системи є:

− сталість рівня випромінюваного коливання,

− не пред'являються строгі вимоги до лінійності амплітудних характеристик у трактах передачі (у радіопередавачах і радіоприймачах),

− для поділу сигналів окремих віщальних програм не потрібно частотної вибірковості.

Для *правильного прийому повідомлень потрібно, щоб тривалість прийнятого елементарного символу була рівною тривалості переданого*. Мовою загальної теорії зв'язку це означає, що в радіоканалі відсутнє післядія (канал без пам'яті). У високошвидкісних цифрових багатопрограмних радіоканалах системи із ВРК ця умова дотримується тільки у відкритому космічному просторі. У каналах наземних систем цифрового радіомовлення за рахунок багатошляхового поширення в точці прийому спостерігається «ефект розширення» переданого символу (інтерференції, накладення декількох копій переданого символу, що прийшли з різним, запізненням), що проявляється як ***міжсимвольні перекручування***. Це явище унеможливлює якісний прийом цифрових даних на рухливому об'єкті, особливо в умовах пересіченої місцевості або в місті з багатоповерховою забудовою.

На рис.13.3 представлено два випадки запізнювання на час $\tau_{зап}$ при прийманні елемента сигналу на величину $\boldsymbol{\tau_{зап} < 0{,}5\,\tau_0}$ й $\boldsymbol{\tau_{зап} >> 0{,}5\tau_0}$.

Видно, що правильний прийом імпульсів в умовах «двухшляховості» можливий лише при $\tau_0 > 2\tau_{зап}$**.** Якщо число шляхів приходу радіохвиль більше двох, то $\tau_0 >> \tau_{зап}$. Величина $\tau_{зап}$ визначається різницею ходу променів Δd і швидкістю РРВ (швидкість світла - С**):** $\tau_{зап} = \Delta \mathbf{d/C}$**.** Оскільки швидкість передачі пов'язана з τ_0 співвідношенням $B = 1/\tau_0$, то вона не повинна перевищувати $B < C/2\Delta d$. Наприклад, при Δd = 1000 км і С = 300000 км/с

величина B < 150 біт/с, а при Δd = 500 км B < 300 біт/с. При Δd = 1 км B < 300 кбіт/с, а при Δd = 100 м величина не може перевищувати B < 3 Мбіт/с.

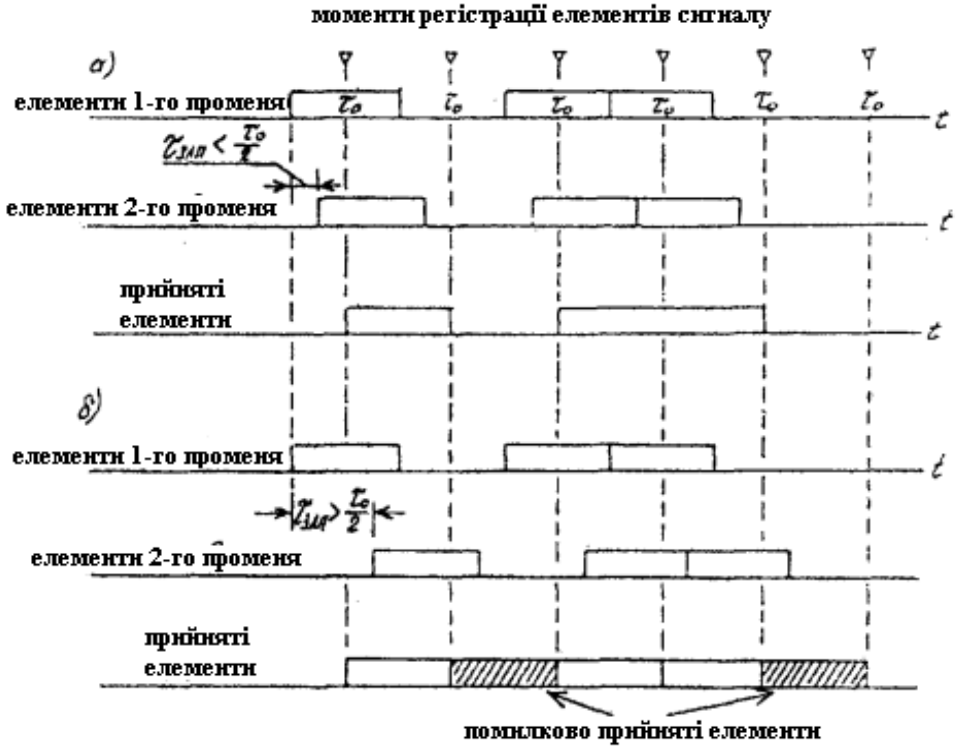


Рис.13.3. До пояснення впливу багатошляховості поширення радіохвиль на міжсимвольну інтерференцію

Отже, *при передачі імпульсного сигналу в умовах багатошляховості останній «розтягується» у часі.* У міру збільшення числа шляхів прийняті антеною відгуки зливаються й можуть утворити безперервний імпульс. Величина $\tau_{расш}$ визначає час очікування, через яке може бути почата передача наступного елемента сигналу τ_0 від випромінювача. Це вимагає зниження швидкості передачі інформації до значення, меншого $1/\tau_{расш}$, для запобігання міжсимвольної інтерференції.

Дослідження показують, що в містах величина $\tau_{расш}$ може досягати 12 мкс і більше. Середнє значення $\tau_{расш}$ становить 0,2 мкс у приміських районах і 3 мкс міських. Тому швидкість передачі цифрової інформації в подібних умовах доводиться знижувати до $B<<1/\tau_{расш}$. Навіть при $\tau_{расш}$ = 1 мкс B << 1 Мбіт/с. Згадане варто враховувати при проектуванні систем цифрового радіомовлення з можливістю прийому в об'єктах, що рухаються.

Для боротьби з мультиплікативними завадами, викликуваними впливом багатошляховості РРВ, використовуються методи рознесеного прийому, еквалайзери, перемеження/деперемеження, застосування коригувального кодування. Однак, *радикальним способом зниження впливу згаданого ефекту є зменшення швидкості в радіоканалі в порівнянні зі швидкістю до модулятора передавача й. нарешті, передача цифрового потоку по паралельних частотних каналах (на безлічі несучих частот)*. На кожній з несучих (піднесучих) передача

цифрових символів здійснюється *з низькими парціальними швидкостями маніпуляції.* У супутниковому зв'язку подібний метод передачі (при використанні відносної фазової маніпуляції) одержав абревіатуру ЧРК-ИКМ-ФМ, а при використанні одного каналу на кожній піднесучій - ОКН-ИКМ-ФМ.

У сучасних системах радіо й телевізійного цифрового мовлення принцип передачі ОКН-ИКМ-ФМ трансформувався в метод передачі широкосмугових багатьочастотних сигналів, кожний з яких являє собою ансамбль, що складається з великого числа ортогональних частотно-частотно-рознесених несучих (звідси й назва-COFDM). При цьому певний відрізок цифрового потоку «розпаралелюється» на рівні складові частини, кожна їх яким передається на своєї окремій піднесучій. Кожна піднесуча передає тільки частина загального

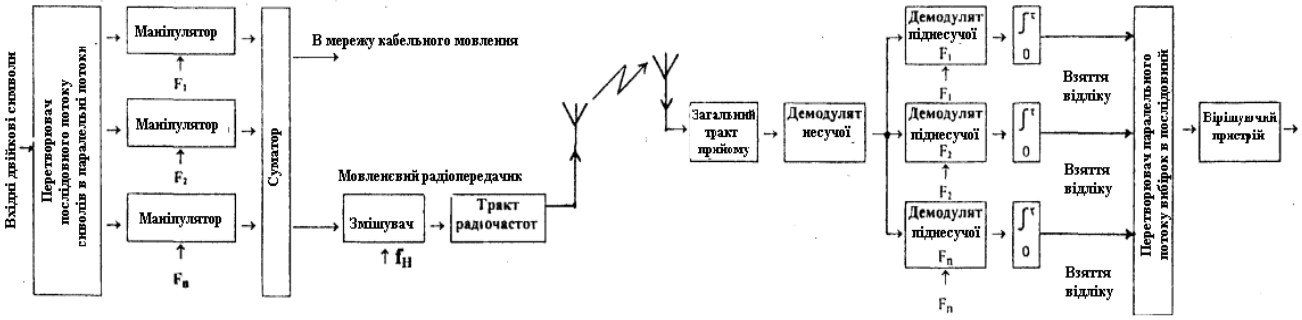


Рис.13.4 Структура системи передачі з COFDM

бітового потоку. Піднесучі маніпулюються одночасно протягом регулярних інтервалів часу. Набір піднесучих, оброблюваних на кожному інтервалі, називається ***COFDM-символом.*** Внаслідок великого числа піднесучих тривалість COFDM-символу істотно більше, ніж тривалість одного біта у вихідному бітовому потоці. Більша тривалість символу дозволяє приймачу чекати, поки не прийдуть всі відбиті сигнали, і тільки після цього зробити оцінку й обробку сигналу. Енергію відбитих променів можна додати до енергії прямого променя й тим поліпшити співвідношення сигнал/завада. Подальше поліпшення процесу обробки можна досягти за допомогою введення перед переданим «пакетом біт» маніпульованих піднесучих COFDM-символу, захисного інтервалу. Під час цього інтервалу приймач «чекає» закінчення інтерференції й починає обробку всіх піднесучих у більше сприятливої завадовій обстановці. Структура системи передачі з ортогональним частотним мультиплексуванням OFDM представлена на рис.13.4.

При **К** піднесучих швидкість передачі на кожній піднесучій може бути знижена в **К** раз у порівнянні з вихідним цифровим потоком, а тривалість тактового інтервалу τ_c збільшується в **К** раз у порівнянні з каналом з послідовною передачею символів. Вибираючи тривалість символу в одному каналі досить великої (так, щоб міджсимвольна завада займала відносно невелику частину символу), можна звести вплив міжсимвольної перешкоди до припустимого рівня. Елементарні посилки в паралельних каналах передаються *синхронно,* що дозволяє виділити імпульси окремих каналів у приймачі без взаємних перешкод. Як відомо, першою практичною системою з

ортогональним частотним мультиплексуванням була система Kineplex (1957 р.).

Вхідний потік двійкових символів (із тривалістю τ_0) розбивається на блоки з n символів і за допомогою перетворювача послідовного коду в паралельний перетвориться в n паралельних символів (кожний тривалістю $\tau_c = n\tau_0$). При маніпуляції (наприклад, фазової) у кожному з n каналів кожний двійковий символ множиться на синусоїдальний сигнал своєї під несучої частоти.

У приймачі опорні коливання на вході кожного демодулятора під несучих (перемножників) ідентичні по частоті й фазі (при фазовій демодуляції) опорним коливанням піднесучих на передавальній стороні. Початок інтегрування й узяття вибірки наприкінці інтервалу інтегрування інтеграторів синхронізовано з початком і кінцем імпульсів тривалістю $\tau = n\tau_0$.

Примітка. У звичайній (асинхронної) системі зі ЧРК-ИКМ-ФМ піднесучі частоти розташовані на такій відстані друг від друга $\Delta F = (1 + \alpha)/\tau$, яке можна дозволити при застосуванні (для розфільтровки парціального спектра однієї несучої від спектрів інших що піднесуть) звичайних фільтрів і демодуляторів. Або інакше - спектри на маніпульованих піднесучих не повинні «накладатися» один на одного, тобто взаємно перекриватися. У таких приймачах (а, отже, і передавачах) між спектрами піднесучих повинні розташовуватися захисні інтервали (α), введення яких знижує ефективність використання радіочастотного ресурсу.

У порівнянні із традиційними системами, що використовують фільтровий спосіб поділу спектрів піднесучих у приймачі (для наступного склеювання загального цифрового потоку - копії потоку до модулятора в передавачі), система з ортогональним поділом сигналів займає меншу смугу частот.

Наприклад, при $\alpha \approx 0{,}1$ ($\tau_{1аШ} \approx 0{,}1\tau_c$; $\tau_c = T_U$. $\tau_c = \tau_U + \tau_{защ}$) виграш смуги частотного спектра становить до 35 %. Цей виграш досягається *за умови строгої синхронізації передачі по всім несучим,* що можливо лише при ретрансляції всіх програм в одному «пакеті» за допомогою одного або декількох синхронізованих радіопередавачів.

Ортогональна» частина в найменуванні OFDM указує на те, що існують точні математичні співвідношення між частотами несучих $\Delta F = 1/\tau$, тобто існує можливість розташувати несучі так, щоб бічні смуги сусідніх що піднесуть перекривалися, однак при цьому зберігалася можливість приймати інформацію без їхнього взаємного впливу. Саме для цього несучі повинні бути математично ортогональні. Лише в цьому випадку може бути реалізоване «щільне впакування» спектра багаточастотного сигналу (з метою звуження спектра випромінюваного сигналу), рис.13.5.

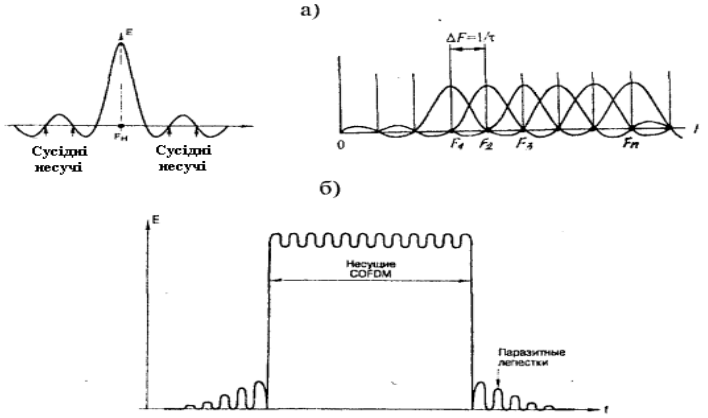


Рис.13.5. Спектр кожної піднесучої сигналу COFDM (а) і ансамблю піднесучих (б)

Так, у стандарті T-DAB частотний інтервал між піднесучими ΔF (залежно від режиму передачі) становить від 1 до 8 кГц. Ширина спектра сигналу COFDM оцінюється наближеним співвідношенням $\Delta F_{сигн} \approx n/Tu$.

Кожна піднесуча в стандарті T-DAB піддається квадратурній відносній фазової маніпуляції «4 - ФМ» (QPSK): комбінації посилок «00» відповідає фаза коливання 0°, «01» - 90°, «10» - на 270°, «11» - на 180°. За рахунок цього знижується швидкість маніпуляції кожної піднесучої у два рази, що сприяє додатковому звуженню спектра кожної піднесучої (теоретично -у два рази).

Інтервал часу, протягом якого здійснюється передача всіх n маніпульованих по фазі що піднесуть, утворить COFDM. символ. Кожний COFDM-символ містить захисний інтервал T_G. Тривалість захисного інтервалу повинна враховувати кінцевий час поширення радіохвиль і задовольняти умові $T_G > r/C$, де r -максимальна відстань між передавачем і приймачем (або між передавачем і ретранслятором), а C - швидкість поширення радіохвиль. Наявність захисного інтервалу є мірою боротьби з міжсимвольної інтерференцією, викликаної мультиплікативними завадами, рис.13.6 (ілюструється та ж ідея, що й рис.13.5).

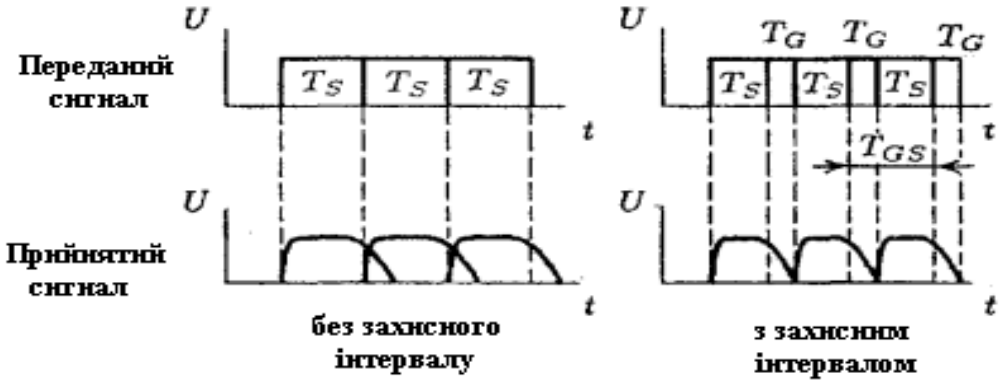


Рис.13.6 Призначення захисного інтервалу при модуляції COFDM

При r = 6 км тривалість захисного інтервалу повинна бути не менш 0,02 мс. Кожний COFDM-символ тривалістю Ts складається із двох компонентів «корисного» інтервалу T_u, під час якого й передаються необхідні дані (корисна інформація), і захисного інтервалу $r_{защ}$ (у документації позначуваного Tg).

При використанні всіх піднесучих виходить майже плоский спектр із невеликими позаполосними (паразитними) складовими

Загальне число несучих залежить від варіанта режимів роботи які у свою чергу залежать від конфігурації мережі мовлення.

Як відзначено вище, зменшення швидкості передачі на кожній несучій забезпечує (разом із введенням захисного інтервалу $\tau_{защ}$) високу завадостійкість у радіоканалах з інтерференцією.

В результаті ширина спектра на кожної несучій звужується: парціальний канал на піднесучій стає нечутливим до селективних завмирань.

Завадостійкість прийому може бути підвищена ще більше, якщо використовувати число несучих більше необхідного (у звичайних умовах) числа парціальних каналів K > n.

Більше число несучих дозволяє здійснити перемеження аудіоданних кожної програми по частоті, що еквівалентно багаторазовому рознесенню сигналів по частоті, їхньому багаторазовому дублюванню (повторенню) у демодуляторі приймача. Так, у базових пропозиціях Європейського союзу радіомовлення (EBU) в 1988 р. передбачалося використання K = 224 несучих, причому кожну з 16 стереофонічних програм планувалося передавати одночасно на 14 несучим.

У результаті подібного рішення ефективна швидкість передачі однієї стереопрограми (близько 260 кбіт/с) трансформується у величину швидкості цифрового потоку на кожній несучій, рівну 260/14 = 18,8 кбіт/с. Тут τ_c= 72 мкс, $\tau_{защ}$ = 8 мкс, а T_U= 64 мкс, що багаторазово перевищує величину максимальної затримки сигналу (пам'яті каналу) при багатошляховому поширенні радіохвиль.

Таким чином, у системі DAB черговість проходження приватних спектрів кожної що піднесе відбувається з навмисним переміженням у часі. Принцип розподілу цифрових сигналів мовлення по піднесучим наведений на рис 9.9,а.

У загальному випадку аудіоданніе розподіляються рівномірно на 1536 піднесучих частот.

Крім того, для підвищення завадостійкості передбачена процедура скремблювання й завадостійкого кодування (лінійним циклічним кодом; Cyclic Redundancy Code - CRC). Вони захищають біти керування й біти старших розрядів оцифрованих сигналів програм мовлення.

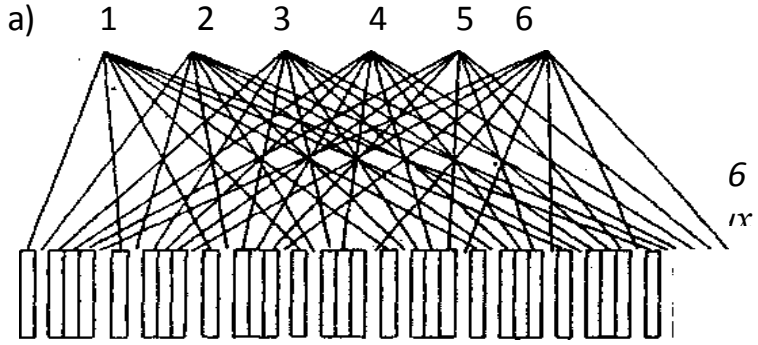
До кожної стереопрограми відноситься декілька піднесучих, які розподілені по всій смузі частот DAB-сигналу й на які біти аудіоданних розподіляються пучками. Якщо один (або декілька) з вузькополосних спектрів піднесучих виявляються ураженими, наприклад, через завмирання (рис.13.7,б), то в приймачі спрацьовує механізм корекції помилок з урахуванням надмірності при передачі.

Корисно виявити «плату» за досягнуті переваги розглянутого методу формування випромінювання.

Пікова потужність залежить від числа сумуємих коливань. На окрему несучу доводиться лише частина пікової потужності передавача **Рпік/К.** І це є своєрідною «енергетичною платою» за інваріантність (несхильність) до багатопроменевості в тракті РРВ. Крім того, у силу великого пік-фактора така система досить критична до реалізації заданого рівня нелінійних перекручувань, що не дозволяє використовувати енергетично ефективний режим посилення в потужних підсилювачах радіопередавачів (як правило, «вичавлювана» потужність з підсилювача, обмежується величиною припустимого коефіцієнта нелінійних перекручувань). Це - також «енергетична плата».

По-третє, через селективні (у вузькій смужці, див. рис.13.7,б) завмирань у багатопроменевому радіоканалі коефіцієнти передачі середовища **РРВ** для різних несучих випромінюваного сигналу можуть істотно відрізнятися. Для

зменшення ймовірності втрати переданої інформації можна дублювати канали прийому (рознесений прийом). Згадане дублювання аргументується наступним чином. Сигнали, що досить рознесені по частоті й за часом, не можуть бути перекручені однаково. Тому елементи інформації, передані в різні моменти часу на несучих, які рознесені за частотою, зв'язані між собою за допомогою кодування вихідної інформаційної послідовності.



Смуга частот сигналу DAB 1,5Мгц

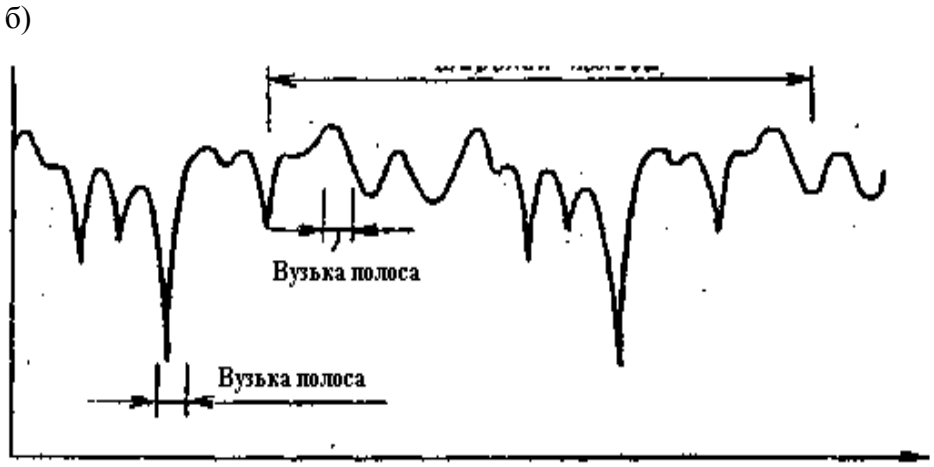


Рис.13.7. Принцип розподілу цифрових сигналів вішання по несучим (а) і залежність завмирань електромагнітного поля в крапці прийому від частоти (б)

Завдяки підсумовуванню декількох копій прийнятого багатопроменевого сигналу досягається краща завадостійкість. Це, як правило, і дозволяє відновлювати в приймачі загублену інформацію завдяки її кореляційному зв'язку (обумовленої кодуванням) з інформацією, прийнятої правильно.

Система COFDM здійснює конструктивне об'єднання результатів багатопроменевого прийому - підсумовування потужностей кожної копії прийнятого сигналу. В основі реалізації викладеного принципу покладене згорткове кодування, декодування за принципом максимальної правдоподібності (алгоритм Вітербі) з м'якими рішеннями, а також перемеження по частоті й за часом (у результаті чого послідовні відліки переданого сигналу піддаються незалежним завмиранням).

На рис.13.8 для ілюстрації представлений COFDM-сигнал у координатах «частота-час»: у часовій області - це послідовність манипульованих символів, розділених захисними інтервалами, а в частотній області - суперпозицією кожного символу є функція (sin(x))/x, отримана за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).

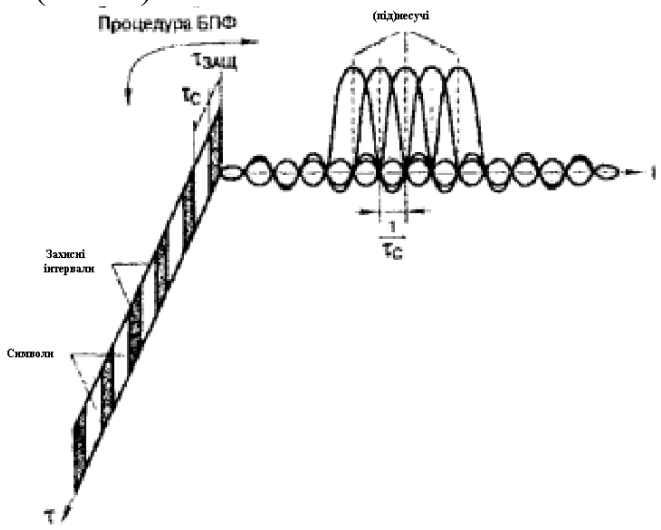


Рис.13.8 COFDM-Сигнал у координатах « частота-час»

Додаткова перевага використання COFDM-сигналів полягає в тім, що в системі відносно висока ефективність (з позицій займаної смуги частот радіосигналу й необхідної потужності) може бути реалізована **в одночастотній мережі мовлення** (!!!).

Використання великої кількості передавачів, що працюють на одній частоті, жорстко синхронізованих по звуковій частоті, які передають ті самі програми мовлення, супроводжується зниженням необхідної потужності передавачів і необхідних відстаней між зонами.

Оскільки луна-сигнали (копії програм мовлення від інших передавачів мережі) підвищують рівень прийнятого сигналу (завдяки додаванню енергії при обробці в приймачі копій не тільки від даної станції мовлення; цей ефект у документації йменується *мережним посиленням),* то у всіх типах приймачів можуть бути використані ненаправлені антени. Це забезпечує можливість установки приймача в рухливих об'єктах, а не тільки в стаціонарних умовах.

На закінчення відзначимо, що системи сигналів COFDM, реалізовані в системах T-DAB і DRM, у цей час одержали подальший розвиток і по своїх параметрах істотно відрізняються від вихідного проекту EBU.

Як треба з викладеного, апаратурна реалізація (паралельного методу передачі на безлічі несучих досить складна навіть при використанні сучасної елементної бази.

Незважаючи на відзначені труднощі, альтернативи паралельному методу передачі аудіоданних у наземних системах цифрового мовлення й поки не знайдено.

Питання для самоконтролю

1. Який зміст терміну «Цифрове мовлення»?
2. Дайте характеристику трьох відомих видів цифрового мовлення.
3. Аргументуйте, які додаткові послуги може запропонувати цифрове радіомовлення.
4. Дайте характеристику типового тракту передачі цифрового радіомовлення.
5. Аргументуйте теоретичні передумови доцільності формування сигналу на декількох несучим у модемі COFDM.
6. Аргументуйте можливі варіанти спільної аналого-цифрової передачі сигналів радіомовлення.

ДОДАТОК Ї. РИСУНКИ ДО ЛЕКЦІЇ №13

Таблица 3.2. **Системы ЦРВ и их основные характеристики**

Наименование системы	Вариант построения			Диапазон рабочих частот	Возможность мобильного приема
	Наземная	НЦРВ	НСС		
T-DAB (Eureka 147/DAB)	+	–	–	ОВЧ+УВЧ (~1,5 ГГц)	Гарантирована
DRM	+	–	–	НЧ,СЧ,ВЧ	Гарантирована
AM IBOC DSB	+	–	–	СЧ	Гарантирована
IBAC и IBOC	+	–	–	ОВЧ	Ограничена
S-DAB (Media-Star)	–	+	+	УВЧ	Ограничена
World Space	–	+	–	УВЧ	Ограничена
Sirius Satellite Radio	–	+	+	УВЧ	Отсутствует
XM Satellite Radio	–	+	+	УВЧ	Отсутствует
DSR	–	+	–	СВЧ	Отсутствует
ADR	–	+	–	СВЧ	Отсутствует
Digital System E	–	+	+	УВЧ	Отсутствует

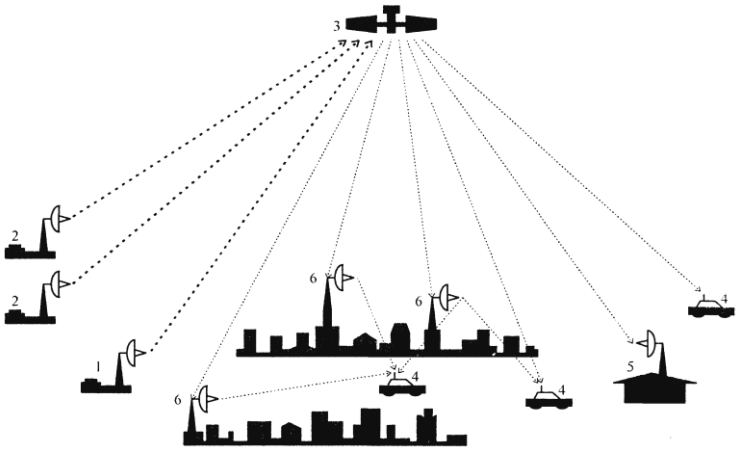
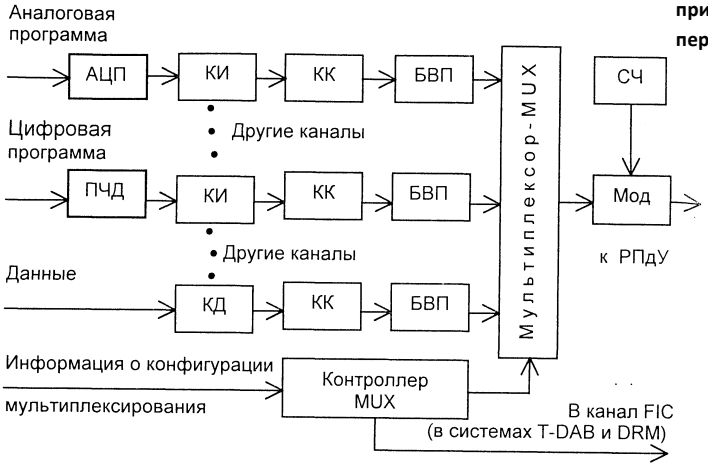


Рис. 3.1. Вариант архитектуры гибридной системы цифрового радиовещания 1– центр управления системой вещания, 2 – основная станция передачи программ на ИСЗ, 3 – бортовой ретранслятор ИСЗ, 4 – мобильная приемная установка, 5 – стационарная приемная установка, 6 – антенны дополнительной наземной сети, где осуществляется переизлучение сигналов ИСЗ.

а) Тракт формирования сигналов ЦРВ



б) Тракт приема сигналов ЦРВ

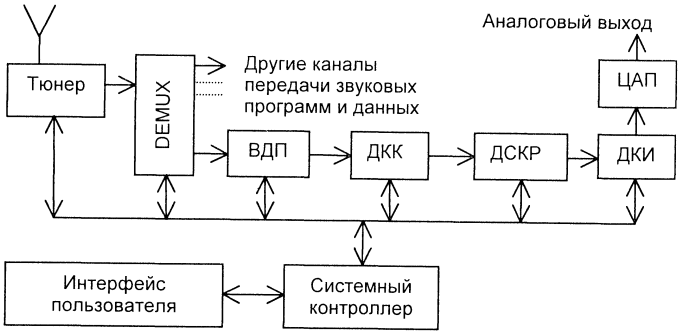


Рис. 3.2. Типовая функциональная схема системы ЦРВ

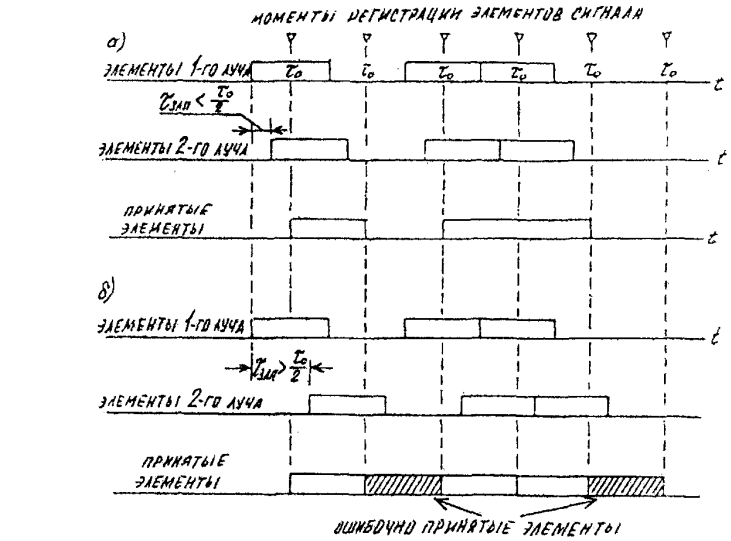


Рис.15.1.К пояснению многопутевости РРВ на межсимвольную интерференцию

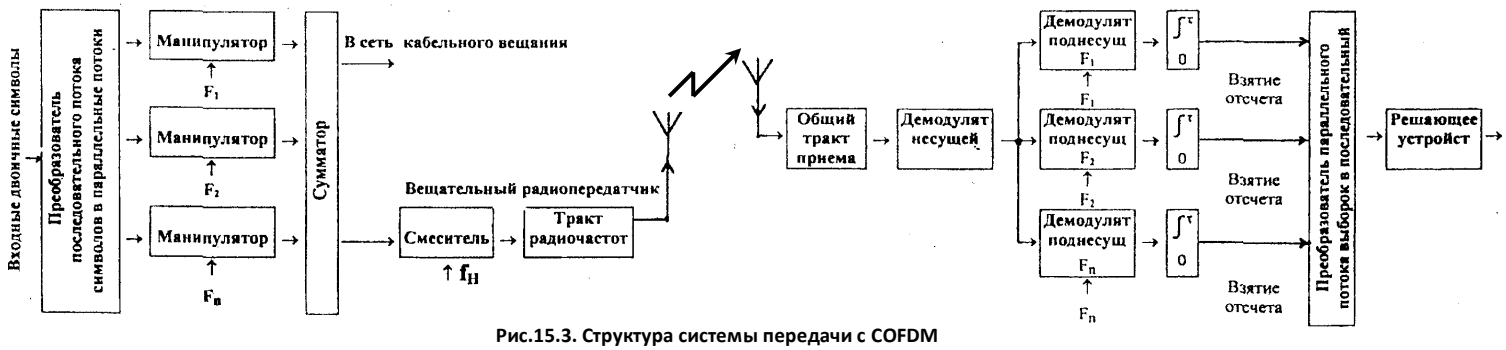


Рис.15.3. Структура системы передачи с COFDM

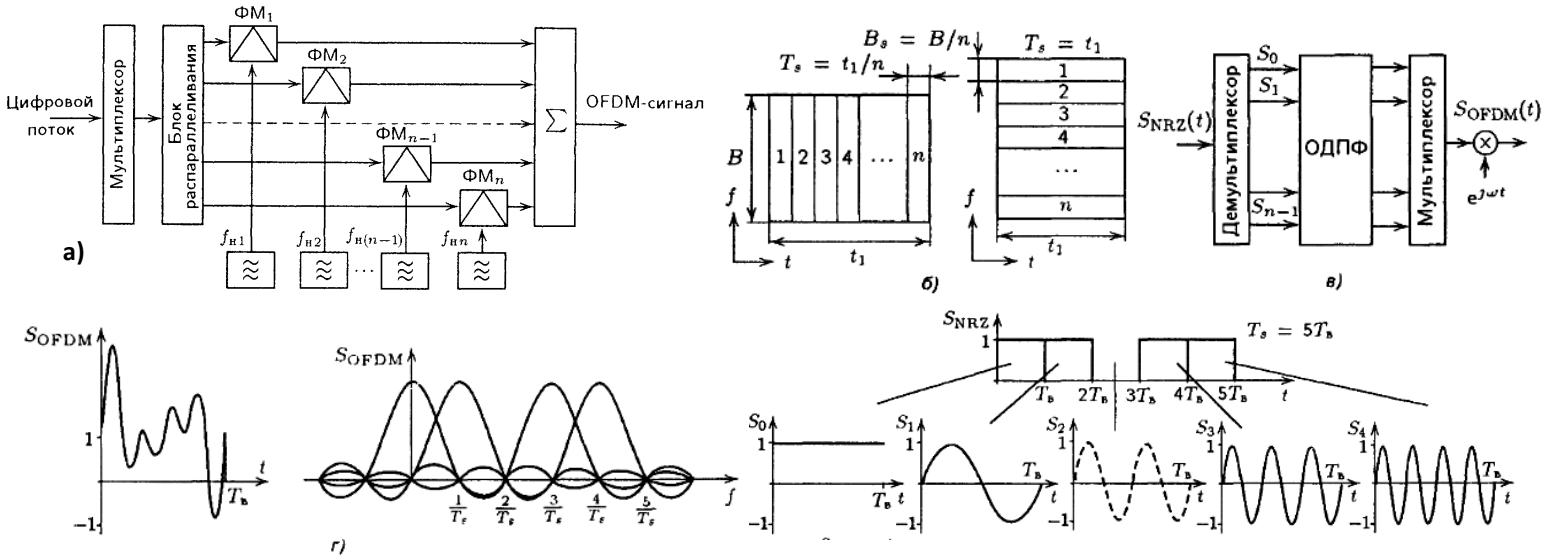


Рис.15.2. К принципу формирования OFDM-сигнала: а – концепция формирования OFDM; б) преобразование последовательной цифровой последовательности символов в параллельную; в) устройство формирования OFDM-сигнала; г) пример формирования OFDM-символа из пятибитовой цифровой последовательности

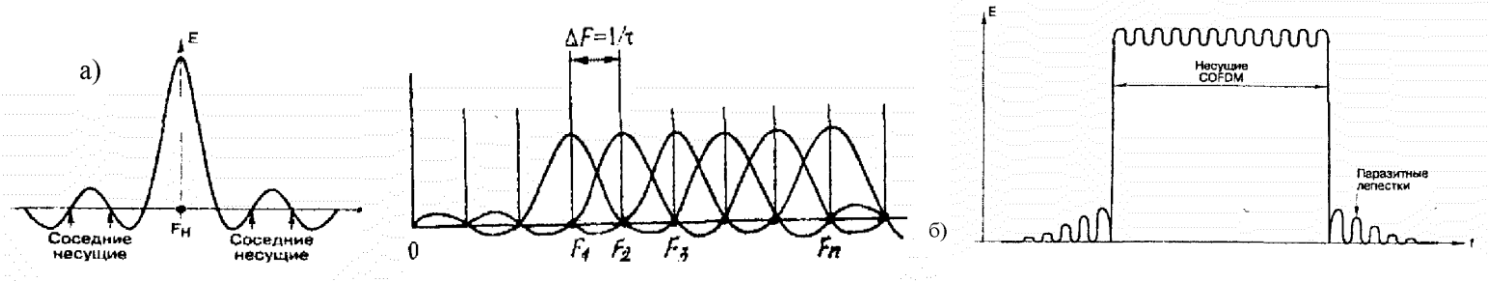


Рис.15.4. Спектр каждой поднесущей сигнала COFDM (а) и ансамбля поднесущих (б)

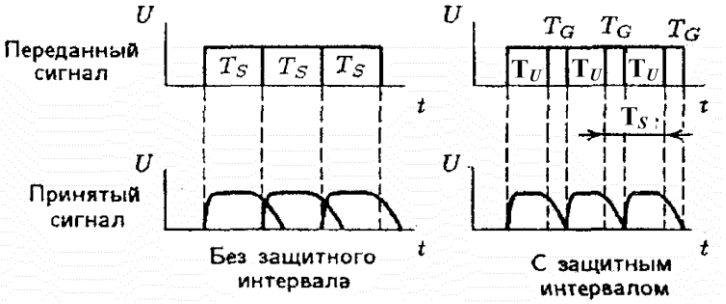


Рис.15.5. Назначение защитного интервала при модуляции COFDM

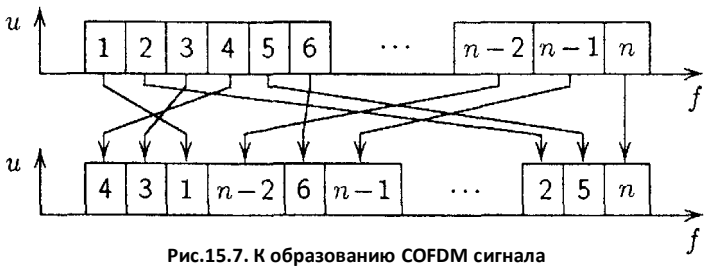


Рис.15.7. К образованию COFDM сигнала

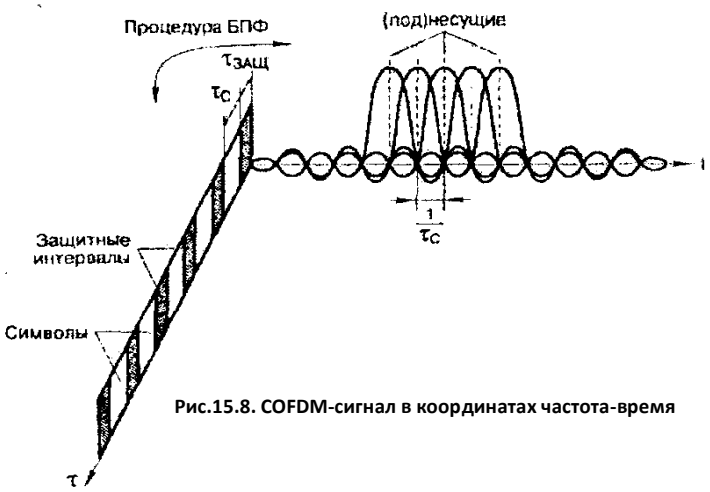


Рис.15.8. COFDM-сигнал в координатах частота-время

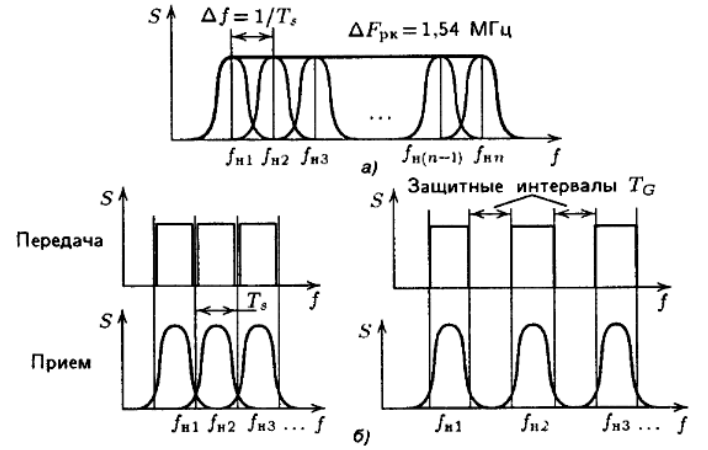


Рис. 18.20. Спектр (*а*) и защитный интервал (*б*) при OFDM-модуляции

ЛЕКЦІЯ №14 ЦИФРОВЕ РАДІОМОВЛЕННЯ СТАНДАРТУ T-DAB

ЛІТЕРАТУРА:

1. Брагин А.С. Технологиивещательных служб. Часть 1. Технологии звукового радиовещания. –К.: НТУУ «КПИ», 2006.
2. Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов./Под ред. Ю. А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком., Радио и связь, 2007. – 872 с.

РОЗДАТНИЙ МАТЕРІАЛ: див. ДОДАТОК К

1. Перспективна система цифрового радіомовлення T-DAB

1.1 Загальні відомості

У Європі заплановане поступове доповнення аналогового стереомовлення із частотною модуляцією цифровою системою радіомовлення (DAB - Digital Audio Broadcasting). Система DAB *призначена для доставки високоякісних цифрових звукових програм і даних,* переданих наземними й супутниковими передавачами в метровому (88 ... 114 МГц) і дециметровому (0,5...2 ГГц) діапазонах частот і прийнятих автомобільними, переносними й стаціонарними приймачами цифрових сигналів, а також за допомогою розподілення через кабельні мережі.

Принципи побудови й параметри системи цифрового радіомовлення **«Eureka 147/DAB»** регламентовані Європейським телекомунікаційним стандартом ETSI EN 300401. У документах МСЭ-Р система **T-DAB** класифікується як *цифрова система А* (Рекомендація SM. 1114-1 «Система наземного цифрового звукового радіомовлення на автомобільні, переносні й стаціонарні радіоприймачі в діапазоні частот 30 ... 3000 МГц»).

Система DAB розроблялася як заміна існуючих мереж з амплітудною й кутовою модуляцією при використанні наземної, супутникової й гібридної (змішаної) передачі. Цифрові радіосигнали мовлення можуть прийматися з використанням простих майже всеспрямованих приймальнх антен.

Система DAB пройшла випробування в ряді європейських країн, а також у Канаді, Австралії, Китаї, Індії, Сінгапурі. Вони підтвердили високі технічні й експлуатаційні характеристики й конкурентоспроможність у порівнянні з іншими системами цифрового радіомовлення, особливо на рухомих об'єктах.

Вона *забезпечує* передачу, прийом і розподіл моно- і стереофонічних програм при наземному, супутниковому й кабельному мовленні. Прийом програм можливий на радіоприймачі з ненаправленою штировою антеною будинку, в автомобілі, що рухається, або в похідних умовах. Можливе використання універсального приймача при реалізації наземного, супутникового й гібридного її варіанта, включаючи підсистему кабельного мовлення.

Система DAB показала високу стійкість до впливу завад (зокрема, завмирань) в умовах багатоповерхової забудови. Якість звуковідтворення порівняна з якістю, гарантованою програвачем компакт-дисків.

Замість великого числа звичайних вузькосмугових каналів у системі DAB використовуються широкосмугові з одночасною передачею в них декількох звукових програм, сигналів даних, різноманітної сервісної інформації. У загальній смузі частот радіосигналу може одночасно передаватися від однієї до дев'яти високоякісних стереофонічних програм і різноманітна додаткова інформація. Меню вибору програм дозволяє власникові приймача мати повну й точну ідентифікацію програм і станцій, одержувати текстову інформацію для водіїв транспорту. Можлива передача газет у кольоровому оформленні, географічних карт і т.п.

У системі передбачена оперативна зміна параметрів мультиплексування переданого багатопрограмного сигналу (кількість і параметри стерео- і монофонічних програм, співвідношення обсягів додаткової інформації в загальному цифровому потоці).

Після розробки спеціалізованої СБИС для приймача вже почато випуск останнього фірмою Philips. Неухильно знижується й вартість приймача (приблизно до $150). Технологію Т-**DAB** можна «вписати» і в систему мобільного зв'язку, як тільки чип радіоприймача буде інтегрований у мобільний термінал системи рухомого зв'язку. Це ознаменує народження інтерактивного радіомовлення («мовлення по запиту») з найбагатшими мультимедійними можливостями.

Найбільш успішно цифрове радіомовлення в даному форматі розвивається у Великобританії й Німеччині. В 2000 р. близько 60% населення Німеччини приймали цифрові радіопрограми, а в 2004 р. передбачається «захоплення» цифровим мовленням всіх федеральних автодоріг. Ще в 2001 р. жителі Лондона приймали не менш 36 цифрових радіостанцій.

Система DAB розроблена з урахуванням реалізації методів ефективного використання спектра при частотному плануванні наземної передавальної мережі (за назвою «одночастотна мережа»), а також з урахуванням застосування малопотужних ретрансляторів, що працюють на єдиній частоті передачі й прийому (gap filler), тобто забезпечують упевнений прийом цифрового сигналу в «мертвих зонах» міст із різноповерховою забудовою.

Система може бути реалізована у вигляді супутникової (S-DAB) або гібридної спутниково-наземної системи радіомовлення з використанням простих практично ненаправлених приймальних антен. Щоб забезпечити прийом програм мовлення на великій території, замість потужного центрального передавача можна використовувати малопотужні просторово розосереджені радіопередавачі.

Зрозуміло, що проблема багатопроменевого (багатошляхового) прийому залишається (глибокі провали рівня прийнятого сигналу особливо помітні в автомобільних приймачах під час руху). Знайдено й широко застосовуються методи подолання цієї проблеми. Завдяки переданим контрольним серіям

тестових послідовностей приймач може ідентифікувати сигнали з різною затримкою й знову скласти їх після її компенсації, усунувши мультиплікативну заваду («еквалайзінг»).

Спрощена структура передавальної й прийомної частини апаратури DAB представлені на рис. 14.1.

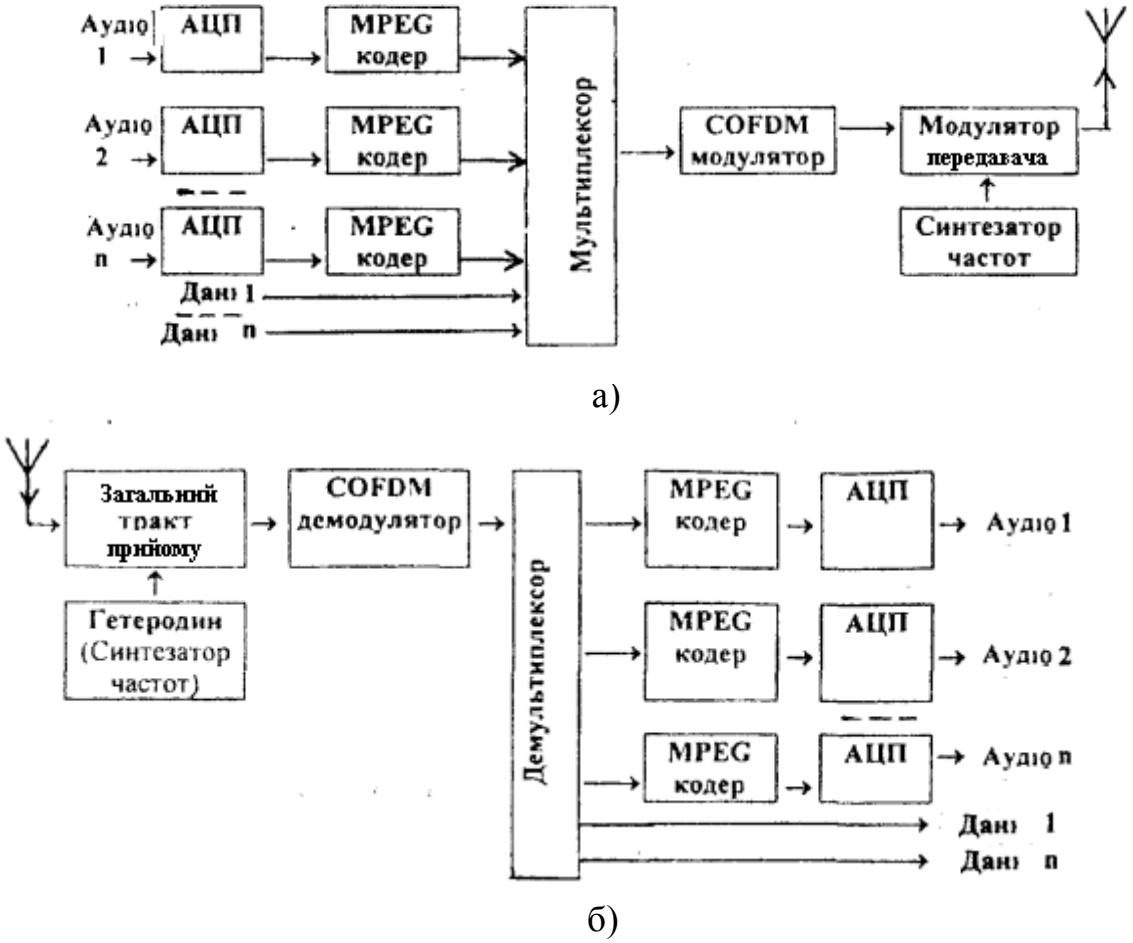


Рис.14.1 Спрощена структурна схема передавальної (а) та приймальної частин апаратури DAB

Вхідні сигнали звукових програм Audio 1, Audio2, ... , Audion і сигнали даних Datenl, Daten2, ... Daten n подаються на АЦП, де перетворюються в цифрову форму із частотою дискретизації 48 кГц і квантуванням 16 біт/відлік.

Передбачено шість варіантів конфігурації системи з відповідними швидкостями передачі.

Варіант 1:9 стереопрограм (9 х 2 х 64 = 1 152 кбіт/с) + сигнал даних (16 кбіт/с).

Варіант 2:6 стереопрограм (6 х 2 х 96 = 1152 кбіт/с) + сигнал даних (16 кбіт/с).

Варіант 3:4 стереопрограми (4 х 2 х 128 = 1024 кбіт/с) + сигнал даних (144 кбит/с).

Варіант 4:2 стереопрограми (2 х 2 х 128 = 512 кбіт/с) + 3 стереопрограми (3 х 2 х 96 = 576 кбит/с) + сигнал даних (80 кбіт/с).

Варіант 5:3 стереопрограми (3 х 2 х 128 = 768 кбіт/с) + 3 стереопрограми (3 х 2 х 64 = 384 кбіт/с) + сигнал даних (16 кбіт/с).

Варіант 6:1 стереопрограма (1 х 2 х 128 = 256 кбіт/с) + 4 стереопрограми (4 х 2 х 96 = 768 кбит/с) + сигнал даних (80 кбіт/с).

Отримані цифрові сигнали піддаються кодуванню у звуковому MPEG-кодері (стандарту ISO/IEC 11172 - 3) з метою компресії (усунення надмірності) цифрових аудіоданних.

Далі всі індивідуальні цифрові потоки мультиплексуються в об'єднаний цифровий потік зі швидкістю порядку 1,5...2,4 Мбит/с. Сформований загальний цифровий потік надходить на COFDM - модулятор. Отриманий на його виході сигнал (із шириною спектра 1,54 Мгц) гетеродинним способом переноситься в передавачі в діапазон робочих частот останнього й випромінюється. На прийомній стороні системи виконуються зворотні перетворення сигналів. Нижче коротко викладаються деякі технічні аспекти функціонування системи.

1.2 Організація цифрових потоків

Структура тракту формування передачі системи T-DAB представлена на рис. 9.4. У ній є практично всі обов'язкові вузли, зображені на рис. 14.2.

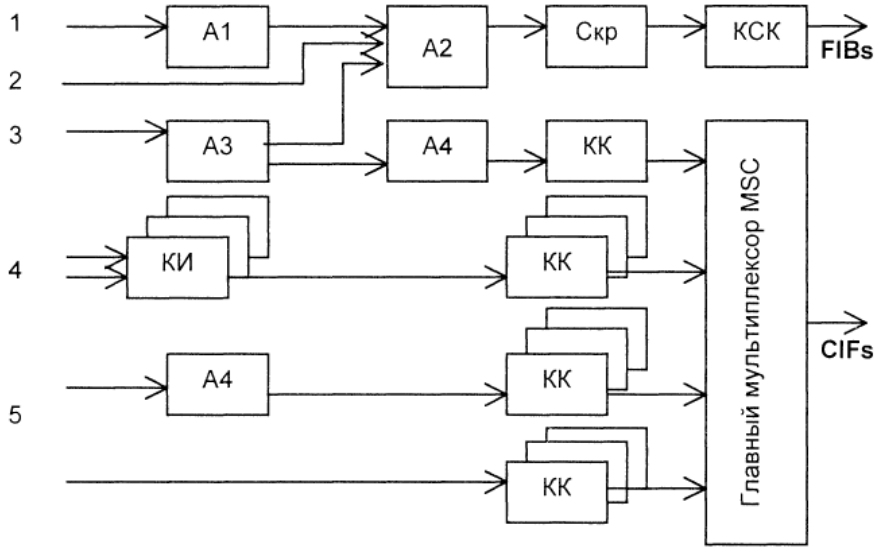


Рис. 14.2. Структура тракту формування передачі системи T-DAB

AI — асемблер FIDS, А2 — асемблер блоку швидкої інформації, А3 — асемблер передачі інформації в каналі користувачі, А4 ~ асемблер пакетного режиму передачі інформації в каналі користувача, Скр — скремблер, КЗК — кодер згортувального коду, КК — кодер каналу (поєднує функції скрембпювання, завадостійкого кодування й перемеженняза часом), КД— кодер джерела (MUSICAM).

У табл.14.1 представлені вхідні сигнали (від різних джерел), з яких формуються компонентні цифрові потоки, а потім і повний кадр (фрейм) передачі.

Для реалізації послуг у передавальній частині системи формується компонентний сигнал, що поєднує необхідну інформацію, передану в трьох каналах:

− *канал передачі користувальницької інформації* (MSC), використовуваний для передачі набору звукових програм, а також даних (при їхній наявності),

− *канал швидкої інформації* (FIC), що забезпечує швидкий доступ до інформації в приймачі користувача; канал містить відомості про конфігурацію мультиплексування, додаткову інформацію про канали користувачів і компоненти каналів даних,

− *канал синхронізації,* що формується усередині передавальної частини системи й використовується для забезпечення функцій демодуляції й декодування в приймачі.

Таблиця 14.1. Вхідні сигнали системи в тракті передачі

№ на рис. 14.2	**Найменування й склад сигналу**	
1	Дані каналу FIC (FIDS+MCI+SI)	
2	Дані для керування мультиплексуванням сигналу цифрового радіомовлення	
3	Інформація, передана в каналі користувача	
4	Звукові програми	Дані, пов'язані із програмою (PAD)
		ІКМ звуковий сигнал із $f_д$ = 24 або 48 кГц
5	Загальні дані для каналу користувача	Дані пакетного режиму
		Дані потокового режиму

Вся інформація в рамках основної послуги мовлення поєднується головним каналом користувальницької інформації MSC.

У каналі разом з аудіоданими передаються дані, пов'язані із програмою (PAD). Це - різноманітна сервісна інформація, що передається разом зі звуком, але не чутна, (наприклад, текст, виведений на рідкокристалічний дисплей приймача і відноситься до звукової програми, або дані, призначені для керування динамічним діапазоном і здійснення індикації типу «музика/мова» і т.п.).

Крім даних PAD, у каналі MSC можуть передаватися додаткові дані (канал AIC), а також дані умовного доступу (CA), що забезпечують перевірку права користувача на доступ і керування цим правом.

Функція керування правом на доступ полягає в розподілі цих прав по конкретних радіоприймачах. Існує кілька видів одержання права на доступ, що відповідають різним способам «підписки» на канал: попередньо внесена плата за програму або плата за обрану в цей момент програму, плата за канал або час. Реалізація цієї функції припускає використання секретних ключів і криптографічних алгоритмів.

Об'єднання компонентних потоків каналу MSC відбувається в головному мультиплексорі користувальницької інформації. Дані, що надійшли, організуються в послідовність загальних фреймів з перемеженням (CIFs). Такий фрейм містить 55296 біт, складається з 864 одиниць ємності (CU), що становлять найменшу адресуєму частину CIFs, і передається кожні 24 мс. Отже, швидкість цифрового потоку в каналі MSC становить **2304** Кбіт/с.

До мультиплексування інформація в каналі MSC обробляється в субканалах, що представляють собою одиницю передачі й складаються із цілого числа CU. Таким чином, у цьому каналі загальний цифровий потік попередньо розділяється на множину субканалів, у яких здійснюється згорткове кодування з рівним (EEP) або нерівним (UEP) захистом символів від помилок. Кожен субканал описується його стартовою адресою (у діапазоні 0 ... 863 CU) і (явно або неявно) розмірами субканала й використовуваним механізмом захисту від помилок.

Використовуються дві форми вказівки використовуваних розмірів субканалів і способів захисту від помилок. Перша, найбільш коротка форма, використовується для звукових канальних компонентів з нерівним захистом від помилок і неявною інформацією про розміри субканалів. Друга форма вимагає явної вказівки розміру субканала й способу захисту від помилок.

Іншою особливістю каналу MSC є використання *двох режимів передачі*:

− ***потокового***, котрий забезпечує пряму передачу від джерела до місця призначення з фіксованою швидкістю (кратної 8 кбіт/с) цифрового потоку в конкретному субканалі й

−***пакетного***, призначеного для передачі декількох компонентів даних різних каналів користувачів у тому самому субканалі.

У потоковому режимі інформація повинна передаватися на вимогу, причому дані повинні бути розділені на логічні фрейми.

У пакетному режимі припустимі швидкості цифрових потоків також повинні бути кратні 8 кбіт/із із умовою відповідності наявної ємності субканала для передачі даних. Пакети ідентифікуються адресою й мають фіксовану довжину. Використовуються чотири стандартних довжини пакета - від 24 до 96 байт, у яких довжина поля даних змінюється відповідно від 19 до 91 байта. Дані про зв'язок між компонентами каналів користувачів і адресами пакетів передаються в MCI (про це нижче).

Вся інформація, необхідна для правильної організації фрейму передачі, що становить основну частину компонентного сигналу цифрового радіомовлення, надходить через канал FIC у вигляді блоків (пакетів даних, що складаються з 256 біт) швидкої інформації FIBs. Пріоритетною інформацією в

каналі FIC є інформація про конфігурацію мультиплексування (MCI), тобто відомості про організації субканалів і канальних компонентів. Це - повторювана інформація про сигнали мовлення, компонентах каналів, субканалах і зв'язках між ними. Для забезпечення швидкого доступу до MCI даного FIBs не піддаються часовому перемеженню (у результаті чого MCI не перетерплюють затримки) і приймач швидко реагує на зміну конфігурації мультиплексування.

З метою безперервності функціонування каналів, **дані MCI про майбутню конфігурацію посилають завчасно** (з випередженням до 6 с).

Крім MCI у каналі FIC передається *сервісна інформація про канали користувачів* (SI), а також *інформація швидкого доступу* (FIDS) - спеціально виділена частина каналу, використовувана для передачі не зв'язаних зі звуком даних (пейджинг, дорожня інформація - TMC, сигнали екстреного оповіщення - EWS).

Зміст сервісної інформації про канали користувачів становлять: найменування каналу мовлення, дата й час, номер і чип програми (новини, музика, спорт), коментарі до радіопрограми, а також ідентифікатори передавача, зони мовлення, регіону й країни, інформація про частоти, про інші сигнали цифрового радіомовлення й т.д.

1.3. Режими передачі

Для того, щоб використовувати радіомовну систему T-DAB у різних конфігураціях сети передавальних станцій і в широкому діапазоні робочих частот, передбачено чотири альтернативні режими передачі.

На різних частотах по-різному (кількісно) може проявлятися ефект Доплера, затримки радіосигналу в умовах прийому на рухомих об'єктах при наявності багатошляховості (багатопроменевості поширення радіохвиль і в умовах « луна-сигналів» від альтернативних радіопередавачів в одночастотної віщальної мережі (SFN).

CEPT ухвалене рішення про використання для цієї системи переважно смуг частот 174 ... 230, 230 ... 240 МГц і 1452 ... 1492 МГц (L-Band). Остання смуга виділена Всесвітньої радіоконференцією ВАКР-1992р. винятково для цифрового радіомовлення як наземного (T-DAB), так і супутникового (S-DAB).

Параметри системи представлені в табл. 14.2.

Режим I найбільш прийнятний для організації наземного мовлення й побудови одночастотних мереж, оскільки дозволяє забезпечити найбільше рознесення радіопередавачів і, отже, обійтися меншою їхньою кількістю при заданій площі обслуговування.

Режим II найбільш прийнятний для мереж місцевого радіомовлення з використанням одного наземного радіопередавача, а також для побудови гібридних (змішаних) наземно-супутникових систем цифрового радіомовлення на частотах до 1,5 ГГц.

Таблиця 14.2. Основні параметри системи в режимах 1-4

Параметри	Режим передачі			
	1	11	111	IV
Діапазон для мобільного прийому, МГц	≤ 375	≤ 1500	≤ 3000	≤ 750
Кількість несучих у модемі COFDM	1536	384	192	768
Рознос несучих частот у модемі COFDM, кГц	1	4	8	2
Сумарна швидкість передачі даних, Мбіт/с	2,4	2,4	2,4	2,4
Тривалість корисної частини OFDM-символу Ts, мкс	1000	250	125	500
Тривалість захисного інтервалу, мкс	≈ 246	≈ 62	≈ 31	≈ 123
Тривалість фрейму сигналу DAB, мс	96	24	24	48
Частота проходження OFDM-символів $1/T_{GS}$, кГц	0,8	3,2	6,4	1,6
Число OFDM-символів у фреймі передачі радіосигналу	76	76	153	76
Швидкість передачі даних у каналі швидкої інформації, Кбіт/с	96	96	128	96
Число біт на OFDM-символ	3072	768	384	1536
Тривалість фрейму передачі, мс	96	24	24	48
Число FIB у фреймі передачі	12	3	4	6
Число CIB у фреймі передачі	4	I	1	**2**
Відстань між передавачами в одночастотній мережі, км	75-96	19-24	9-12	48

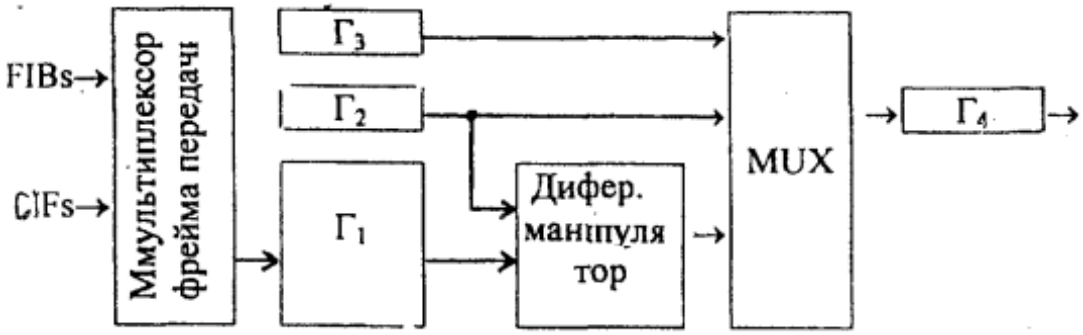
Режим III більш придатний для організації супутникового і наземного мовлення, що його доповнює, на частотах до 3 ГГц, а також для використання в сучасних широкосмугових мережах кабельного телебачення в діапазоні частот 47 ... 862 Мгц.

Режим IV оптимізує параметри DAB-сигналу для використання в мережах SFN, що організуються в L-диапазоні. Він забезпечує більше рознесення радіопередавачів в одночастотній мережі, чим режим III.

2. COFDM в стандарті DAB

Продовженням схеми рис.14.1 є схема формування сигналу передачі, рис. 14.3. Призначення інших функціональних блоків зрозуміло з позначень під малюнком.

У генераторі Г1 поетапно здійснюється: поділ послідовності блоків FIB і фреймів CIF на блоки даних, що відповідають символам OFDM, відображення (тобто формування) символів фазової маніпуляції й перемеженняд аних по частотах у межах смуги випромінювання передавача.



Г1 − генератор символів FIC і MSC, що має у своєму составі роздільник блоків, засіб відображення символу ФМ-4 (QPSK) і пристрій перемеження по частоті; Г2 − генератор символу опорної (еталонної) фази; Г3 − генератор нульового символу; MUX − мультиплексор сигналу передачі; Г4 − генератор символу OFDM.

Рис. 14.3 Схема формування сигналу передачі

У мультиплексорі фрейму передачі формується фреймова структура переданого сигналу (із блоків швидкої інформації FIB і CIF каналу MSC) відповідно до табл.14.2.

Структура фрейму передачі системи DAB наведена на рис. 14.4.

Підсумковий цифровий потік (DAB-Ансамбль із декількох звукових програм) разом з каналами синхронізації й швидкої інформації (FIC) передається фреймами на часовому інтервалі $\mathbf{T_{фр}}$.

Набір параметрів фрейму визначений для кожного із чотирьох режимів передачі, використання яких залежить від конфігурації мережі й обраних робочих частот (табл.14.2).

Кількість символів (L) у фреймі передачі залежить від режиму (табл.14.2). *Параметри сигналу передачі системи DAB* задані стандартом таблично для всіх режимів передачі. Основні з них наведені в табл.14.3.

У ній: $\mathbf{T = 1/2{,}048.10^6}$ (с) − період тактової частоти; $\tau_{защ}$ − захисний інтервал; $\mathbf{T_s = T_u + \tau_{защ} = T_ф/L}$ − сумарна тривалість OFDM-сигналу; $\mathbf{T_0}$ – тривалість символу синхронізації; $\mathbf{n}$ – кількість несучих; $\mathbf{\Delta f_{нес} = 1/T_u}$ - відстань між несучими (крок сітки частот, що піднесуть); $\mathbf{R_k = R_s/n}$ - швидкість цифрового потоку на одну несучу; $\mathbf{\tau_c = 1/R_k = T_s/2}$ - тривалість посилки модульованого сигналу окремого підканалу (з кожним OFDM-символом кожна несуча переносить два біти інформації, що свідчить про квадратурну

маніпуляцію несучих); $\mathbf{R_s}$ = **2,4 Мбіт/с** - сумарна швидкість передачі даних у системі.

Ширина спектра сигналу $\mathbf{\Delta f_{сигн} = n\,\Delta f_{нес}}$ = 1,54 МГц.

Рис.14.4 *Структура фрейму передачі системи DAB*

Таблиця 14.3. Параметри сигналу передачі системи DAB

Параметр	**Режим передачі**			
	1	**II**	**III**	**IV**
L	76	76	153	76
n	1536	384	192	768
$\mathbf{T_ф}$	196608T (96 мс)	49152T (24 мс)	49152T (24 мс)	98304T (48 мс)
$\mathbf{T_0}$	2656T (1,3 мс)	664T (324 мкс)	345T (168 мкс)	1328T (648 мкс)
$\mathbf{T_s}$	2552T (1,25 мс)	638T (312 мкс)	319T (156 мкс)	1276T (623 мкс)
$\mathbf{T_u}$	2048T (1мс)	512T (250 мкс)	256T (125 мкс)	1024T (500 мкс)
$\mathbf{T_{защ}}$, **мкс**	504T (246 мкс)	126T (62 мкс)	63T (31 мкс)	252T (123 мкс)
$\mathbf{\Delta f_{нес}=1/T_u}$	1	4	8	2
$\mathbf{R_k}$, кГц	1,56	6,25	12,5	3,125
$\mathbf{\tau_c}$,мкс	640	160	80	320

Можна переконатися, що *ширина спектра маніпульованої парціальної піднесучої дорівнює частотному розносу несучих*. Оскільки для фазоманіпульованого сигналу справедливе співвідношення $\mathbf{\Delta f \approx R_k/(0{,}8B)}$, де **B**

- кратність маніпуляції фази, то для дворазової ОФМ-4 для всіх режимів справедливо наближена рівність $\Delta f \approx \Delta f_{нес}$.

На закінчення відзначимо, що представлене вище ілюструє лише принцип формування OFDM-сигналу. У дійсності в передавачі **цифровий сигнал** (включаючи фазову маніпуляцію) **формується програмно** в частотній області з використанням алгоритмів швидкого перетворення Фур'є (прямого й зворотного), для реалізації яких створені процесори у вигляді великих інтегральних схем. Згадані алгоритми є предметом вивчення в спеціальній дисципліні «Цифрова обробка сигналів».

3. Особливості побудови мереж цифрового радіомовлення

3.1 Порівняння із системами аналогового радіомовлення

Перехід до цифрового радіомовлення на метрових хвилях (замість аналогового) припускає надання більш високої якості радіомовного прийому. Це зумовлює перехід від методу планування мережі за рекомендацією "90% часу і 50% точок прийому", прийнятого в аналоговому радіомовленні, до більш суворих критеріїв, наприклад, "99% часу і 99% точок прийому". Подібний перехід не супроводжується плавною зміною якості прийому (як в аналоговому мовленні: при плавному зменшенні напруженості поля сигналу якість прийому погіршується плавно).

У системах цифрового мовлення проявляється пороговий ефект: зниження напруженості поля сигналу нижче деякого порогу (обумовленого захисним відношенням!) призводить до повного пропадання сигналу на прийомі. Саме тому неприйнятною є ситуація, коли не гарантується прийом сигналу радіомовлення протягом 10% часу, а також доведення програми мовлення лише до 50% слухачів.

Кількісні критерії, прийнятні для планування аналогового радіомовлення стають неприйнятними для цифрового.

Питання планування мереж цифрового радіомовлення в діапазоні вище 30 МГЦ розглянуті в [13,14]. Розвиток методик планування цифрових мереж радіомовлення триває. Нижче викладаються тільки деякі аспекти такого планування.

3.2 Параметри систем радіомовлення, необхідні для проектування та планування цифрової мережі радіомовлення

Вибір основних системних параметрів при проектуванні систем і плануванні мереж цифрового радіомовлення вимагають обліку особливостей умов поширення радіохвиль (площа обслуговування, рельєф місцевості, висота забудови, рівень шумів і завад), а також відсотку часу, протягом якого має місце гарантована якість прийому, та ін.

Нижче приводиться неповний перелік параметрів систем радіомовлення:

- кількість і тип (моно, стерео, комбіноване стерео) звукових програм в одному пакеті та загальна кількість різних по складу пакетів програм на території обслуговування,

- географічне положення та розміри території обслуговування, переважаючий рельєф місцевості (тільки рівнинна або слабко пересічена місцевість із населеними пунктами малоповерхової забудови допускає можливість використання безпосереднього цифрового радіомовлення; горбкувата або гірська місцевість, населені пункти з багатоповерховою забудовою вимагають застосування систем T-DAB або наземно-супутникових систем),

- метод передачі сигналів (послідовний або паралельний),

- діапазон і допустима ширина смуги частот радіосигналів,

- метод кодування джерела та степінь зжимання сигналу,

- метод кодування каналу та розміри матриці перемежування,

- вид і параметри модуляції,

- рознесення несівних частот передавачів,

- вибірковість і смуга пропускання приймача,

- тип демодулятора та спосіб прийняття рішень у ньому,

- спосіб організації радіомовлення на заданій території (тип мережі мовлення - одно- або багаточастотна),

- характеристика завадообстановки в зоні обслуговування і т.д.

Дані параметри беруть участь у реалізації наданих системами радіомовлення **споживчих якостей (послуг)** на території обслуговування.

Розрізняють два *види послуг* - тільки стаціонарний прийом або мобільний і стаціонарний прийом.

Обсяг послуг може передбачати:

- радіомовні програми плюс необхідний мінімум додаткової цифрової інформації,

- радіомовні програми плюс великий обсяг додаткової цифрової інформації, зокрема послуг, не пов'язаних із прийомом звукових програм (пейджинг, телефакс, GPS та ін.).

Якість звукових програм може бути, наприклад, такою:

- тільки стерео, якість компакт-диску,

- стерео плюс моно,

- тільки моно, звичайна якість мовлення.

Умови прийому сигналів мовлення, типові для території обслуговування, у вирішальній степені впливають на вибір варіанта побудови системи та мережі, а, отже, на технічну складність і вартість їхньої реалізації.

У випадку використання супутникового сегменту в проектованій системі мовлення повинні бути задані:

- тип і висота орбіти ШСЗ (у тому числі припустимі межі для координат точки стояння ШСЗ на геостаціонарній орбіті),

- частота радіоканалу "вниз" (на лінії ШСЗ-Земля) і припустима ширина смуги частот,

- обмеження на припустиму густину потоку потужності радіосигналу в поверхні Землі.

3.3 Особливості планування мереж цифрового радіомовлення

Для проектування мереж цифрового радіомовлення **на частотах нижче 30МГц** у значній мірі придатні рішення, підтверджені практикою для традиційних наземних систем мовлення з амплітудною модуляцією. Зрозуміло, є і своя специфіка. Пояснимо це.

При розробці основних аспектів цифрового радіомовлення спочатку передбачалася орієнтація на традиційні багаточастотні мережі при використанні послідовної передачі сигналу.

Ідея багаточастотної мережі полягає в тому, що в різних зонах обслуговування використовуються різні смуги частот (канали радіомовлення). Наприклад, у трьохчастотній мережі використовуються три смуги частот, причому в кожній смузі кожна радіопрограма випромінюється на своїй робочій частоті. Якщо в трьохчастотній мережі необхідно передати шість програм мовлення, то потрібно використовувати 18 несівних (робочих) частот. За рахунок частотного та територіального рознесення знижується рівень взаємних завад - при переході до трьохчастотної мережі та захисному відношенні 6 дБ виявляється можливим практично повне покриття території мовленням при прийманні на ненаправлену антену.

Платою за цю безсумнівну перевагу виступає ускладнення (і подорожчання) приймача (приймач повинен містити синтезатор частот, що виконує функції гетеродину) і модулятора передавача. Чим більше програм мовлення, тим погіршені згадані недоліки.

Залишається і проблема боротьби із багатопроменевістю. В умовах слабкої багатопроменевості (рівнинна та слабкопересічна місцевість, а також малоповерхові міста) застосування послідовної передачі цілком прийнятно і навіть доцільно, оскільки зі збільшенням числа програм не відбувається пропорційного збільшення швидкості передачі в радіоканалі. При проектуванні таких мереж цілком прийнятно користуватися методикою планування станцій мовлення традиційного аналогового радіомовлення в діапазоні метрових хвиль.

Аналіз показує, що виходячи із допустимої ймовірності помилок при прийманні $10^{-3}...10^{-4}$, необхідна величина захисного відношення при когерентному прийомі становить від 8 дБ (при бінарній відносній фазовій маніпуляції ОФМ-2) до 12...15 дБ (при чотирьохпозиційній -ОФМн-4).

Якщо **при одночастотному плануванні** гіпотетичної мережі мовлення використовувати найпростіші ненаправлені антени, то зона обслуговування складатиме лише 50% від заданої (при ОФМ-2) і до 35% (при ОФМн-4). Застосування ж направлених приймальних антен з коефіцієнтом підсилення не менше 20 дБ знижує вплив заважаючих станцій і збільшує зону обслуговування до стопроцентної.

Одночастотна мережа цифрового радіомовлення з послідовним методом передачі цифрових сигналів забезпечує повне покриття території тільки при прийманні на направлені антени, і тому **може відігравати роль лише розподільної системи**.

З викладеного вище випливає, що прийом на автомобільні приймачі (найважливіша умова роботи цифрового радіомовлення!) в одночастотній мережі ускладнений.

Загальні положення по побудові систем і плануванню мереж цифрового радіомовлення на частотах вище 30 МГц фахівці сформулювали наступним чином:

- мережа цифрового радіомовлення повинна забезпечувати повне покриття території мовленням при прийманні до шести стереофонічних програм на стаціонарні приймачі з направленою антеною і на переносні та автомобільні приймачі з ненаправленою антеною; імовірність упевненого прийому як на відкритій місцевості, так і в умовах міста з інтенсивною багатоповерховою забудовою повинна бути не менше, ніж при традиційному мовленні на метрових хвилях (у діапазонах 66...74 і 88...108 МГц);
- радіомовна мережа, діапазон частот і методи передачі повинні бути спільними як для стаціонарного, так і для мобільного прийому;
- мережа мовлення повинна володіти електромагнітною сумісністю зі службами, що працюють у тих же діапазонах, як усередині країни, так і за її межами.

Для перспективного планування ефірних мереж цифрового радіомовлення та телебачення важливим пунктом є забезпечення 100-процентного покриття території країни (чого не було в аналогових системах радіомовлення). Даний пункт визначає принципи призначення робочих частот станцій мовлення, розташування останніх, обґрунтований вибір потужності станцій і висот підвісу передавальних антен, тобто те, що становить зміст частотно-територіального рознесення радіоелектронних засобів.

Практична реалізація згаданого положення ускладнена. Тому виникає необхідність використання додаткових засобів мовлення, наприклад, у рамках змішаної (гібридної) наземно-супутникової системи.

Прийняття європейського стандарту для наземної версії цифрового радіомовлення T-DAB, що використовує *паралельний* (багаточастотний) метод передачі кількох програм (систему COFDM, не плутати з багаточастотною мережею), уможливлює розгляд даного варіанту побудови мережі як альтернативу багаточастотній. У стандарті T-DAB "розпаралелювання" програм відбувається по піднесучих частотах (до модуляції несівної), тоді як у багаточастотній мережі розпаралелювання відбувається по несівних частотах.

До параметрів планування мережі мовлення в діапазоні метрових хвиль відносяться:

1. Ефективно випромінювана потужність (добуток вихідної потужності передавача на коефіцієнт підсилення передавальної антени), (дБ/кВт).
2. Висота підвісу передавальних антен, (H_1, м).

3. Відстані між передавачами мережі (D, км).
4. Число використовуваних частот.
5. Криві поширення радіохвиль (див. наприклад, рис. 11.3).
6. Граничний відсоток точок прийому (L).
7. Допустимий відсоток часу появи завад.
8. Мінімально допустима напруженість поля ($E_{мін}$, дБ/мкв/м).
9. Ступінь нерівності місцевості (F(Δh), дБ).
10. Висота приймальної антени (H_2,м).
11. Захисне відношення (А, дБ).

При частотному плануванні мережі завдання вирішується з акцентом на ефективність використання радіочастотного спектра (ресурсу).

Згадана ефективність визначається шириною спектру радіосигналу (спектральною ефективністю радіосигналу) і використовуваною кількістю несівних (робочих частот).

Спектральна ефективність модульованого сигналу оцінюється показником

$$\gamma = R_{\Sigma}/\Delta f_{сигн},\ (біт/с)/Гц.$$

Тут R_{Σ} - швидкість сумарного (з урахуванням біт надлишковості та синхронізації) цифрового потоку, біт/с, $\Delta f_{сигн}$ - частотна смуга випромінюваного сигналу, Гц. Параметр **γ** показує, скільки біт у секунду можна передати в смузі шириною 1 Гц. Величину $\Delta f_{сигн}$ зазвичай визначають як смугу, у межах якої міститься 99% випромінюваної потужності. Орієнтовна оцінка величини **γ** часто обчислюється як

$$\gamma=0{,}8\log_2 M=0{,}8B,$$

де $B=\log_2 M$ - кратність маніпуляції, а **M** - число позицій (станів) маніпулюємого параметра: $M= 2^B$. Урахування додаткових біт (синхронізації та завадостійкого кодування) веде до зменшення теоретичної оцінки орієнтовно на 15...20%, оскільки становить інтерес ефективність використання спектру для передачі *інформаційного потоку*.

Реально досяжні значення **γ** для застосовуваних у цифровому радіомовленні видів маніпуляції представлені в табл. 14.4.

Таблиця 14.4. Спектральна ефективність радіосигналів з ФМн і КАМ

Вид модуляції	γ, (біт/с)/Гц	$\Delta f_{сигн}$, Гц	h, дБ	q, дБ
ВФМн-2	**0,6…0,8**	$0{,}8R_{\Sigma}$	**10,5**	**10,5**
ВФМн-4, 4КАМ	**1,25…1,5**	$0{,}8R_{\Sigma}/2$	**10,5**	**13,5**
16КАМ	**2,5…2,8**	$0{,}8R_{\Sigma}/4$	**17**	**20,5**
32КАМ	**3,2…3,5**	$0{,}8R_{\Sigma}/5$	**18,9**	**23,5**
64КАМ	**3,8…4,0**	$0{,}8R_{\Sigma}/6$	**22,5**	**26,5**
128КАМ	**4,5…4,8**	$0{,}8R_{\Sigma}/7$	**24,3**	**29,5**

Параметри **h** (необхідне відношення сигнал/шум на вході приймача на один біт інформації) і **q** (необхідне відношення сигнал/шум на вході приймача на один маніпуляційний символ) характеризують завадостійкість і енергетичну ефективність вибраного виду маніпуляції. Видно, що **кожне подвоєння**

кратності маніпуляції приводить до необхідності подвоєння випромінюваної потужності.

Величина спектральної ефективності радіосигналу визначається "компактністю" спектру - часткою потужності, зосередженої в головному "пелюстку" спектра, тобто в смузі частот між першими "нулями" (рівної $2/\tau_c$, де τ_c - тривалість маніпулюючих імпульсів). У головному пелюстку спектра сигналу повинно знаходитись не менше 94...97% всієї енергії сигналу. Головний пелюсток широко розповсюдженого сигналу ОФМн-4 містить близько 87% енергії сигналу і саме тому спектральна ефективність останнього не перевершує 1,5 (біт/с)/Гц.

Результатами табл.14.4 можна користуватися при виборі системи цифрового мовлення для конкретної запланованої мережі. Так, для реалізації системи T-DAB виявилося достатнім мати спектралыну ефективність радіосигналу не гірше 1,3...1,5, що й зумовило застосування квадратурної ВФМн-4. У консорціумі DRM закріплено застосування сигналів КАМ (від 4-КАМ до 64-КАМ), оскільки вимоги до спектральної ефективності більш високі. Подальшому покращенню спектральної ефективності радіосигналу сприяють застосування формуючого (згладжуючого) фільтра після модулятора та строгі вимоги до лінійності підсилювача сформованих сигналів.

Іншим способом підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу є організація цифрового мовлення за допомогою одночастотної мережі, оскільки всі радіопередавачі мовлення працюють у спільній смузі частот $\Delta f_{сигн}$. Однак, в одночастотній мережі для реалізації заданого захисного відношення **А** можливе тільки територіальне рознесення передавачів. Знайдено, що навіть у мережах аналогового високоякісного мовлення в метровому діапазоні 100...108МГц можна забезпечити суцільнопокриту територію лише трьома стереофонічними програмами.

Примітка. Відповідно до визначення, захисне відношення - це мінімальне значення відношення корисного сигналу до завади на вході приймача, якому відповідає певна якість звучання на його виході. У цифровому радіомовленні оцінка якості може бути замінена однозначно пов'язаною з нею ймовірністю появи помилок $p_{пом}$ на виході декодера.

У свою чергу, зв'язок номінальної величини $p_{пом}$ із якістю звуковідтворення визначається за відомою методикою (зокрема, з урахуванням вимог, предявлених рівню шуму інтерполяції, однозначно зумовленого величиною інтервалу маскування). Наприклад, у каналі мовленні з ВФМн без надлишкового кодування необхідна $(p_{пом})_{ном} \le 10^{-9}$. При введенні кодової надлишковості дана величина може бути збільшена на три-чотири порядки.

У зв'язку із цим при плануванні мереж цифрового радіомовлення під зоною (територією) обслуговування розуміється площа, у межах якої протягом заданого відсотку часу забезпечується виконання умови $p_{пом} < (p_{пом})_{ном} = 10^{-3} \dots 10^{-5}$. Величина $(p_{пом})_{ном}$ залежить від виду маніпуляції, способу обробки цифрового сигналу в приймачі, варіанту надлишкового кодування та застосовуваних способів маскування.

Для мовлення різних наборів (пакетів) звукових програм у суміжних зонах мовлення вимушено використовуються багаточастотні мережі із кластерним способом покриття території. Територія покривається набором однакових кластерів, які складаються у свою чергу з однакових зон обслуговування (комірок).

На рис.14.5 представлена стільникова структура організації мовлення на території радіусу R з комірками радіусом R і використанням дев'яти частот у кластері. Комірки (зони обслуговування) з центром розміщення станції мовлення представлені в наглядному стільниковому кресленні (гексагональної форми).

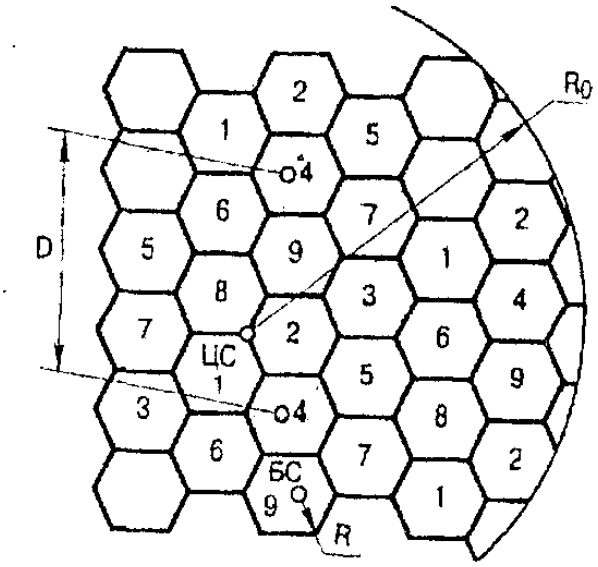


Рис. 14.5 Приклад стільникової структури організації мовлення

При стільниковому покритті реалізація заданого захисного відношення визначається величиною кластера $\mathbf{К_{кл}}$ (числом комірок у наборі, що має неспівпадаючі робочі частоти). Від цієї величини залежить відстань між зонами із співканальними завадами, тобто завадами прийому програм від найближчих радіопередавачів мовлення з однаковими несівними. Зі збільшенням $\mathbf{К_{кл}}$ зростає відстань **D** (територіальне рознесення) між радіопередавачами з однаковими робочими частотами.

Тому при проектуванні (плануванні) мереж на частотах вище 30 МГц для випадку суцільного покриття території обслуговування, як правило, орієнтуються на стільниковий варіант покриття із числом частот, визначеними зі співвідношення $\mathbf{К_{кл}=(a+b)^2-ab}$, де a і b - цілі позитивні числа. Мережа може бути трьохчастотною, чотирьохчастотною, семичастотною і т.д. Зрозуміло, що з метою економного використання радіочастотного ресурсу варто прагнути до зменшення $\mathbf{К_{кл}}$. При $\mathbf{К_{кл}}$ =3 мережа буде трьохчастотною, при $\mathbf{К_{кл}}$=9 – дев’ятичастотною. Дана ідея може використовуватися при стільниковому покритті території кожним з можливих варіантів - у наземних мережах, променями супутникового мовлення від ретрансляторів на ШСЗ (система S-DAB "MediaStar"), рис. 14.6, і в комбінованих наземно-супутникових мережах.

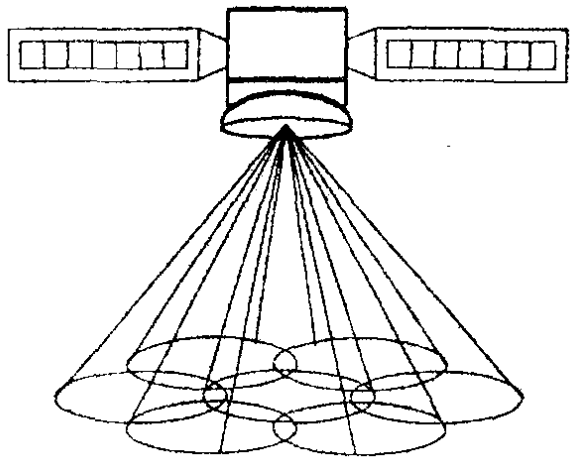


Рис. 14.6 Використання багатопроменевої антени ретранслятора на ШСЗ для стільникового покриття території обслуговування

Мережі передавачів T-DAB плануються за принципом один передавач, або одночастотна мережа, що використовує ненаправлені антени ("відкрита мережа"), або одночастотна мережа станцій, що використовують направлені антени по периметру

території покриття ("закрита мережа").

Завдання планування полягає в тому, щоб забезпечувався прийнятний компроміс між щільністю передавачів для заданого покриття та можливістю повторного використання тих самих частот з іншим програмним наповненням в інших зонах території обслуговування.

Питання для самоконтролю

1. Дайте характеристику типового тракту передачі цифрового радіомовлення стандарту T-DAB.
2. Аргументуйте можливості системи цифрового радіомовлення стандарту DAB.
3. Аргументуйте доцільність чотирьох режимів передачі у стандарті T-DAB.
4. Аргументуйте труднощі створення синхронних мереж цифрового мовлення і способи подолання цих труднощів.
5. Аргументуйте параметри систем мовлення, необхідні для проектування та планування цифрової мережі мовлення.

ДОДАТОК К. РИСУНКИ ДО ЛЕКЦІЇ №14

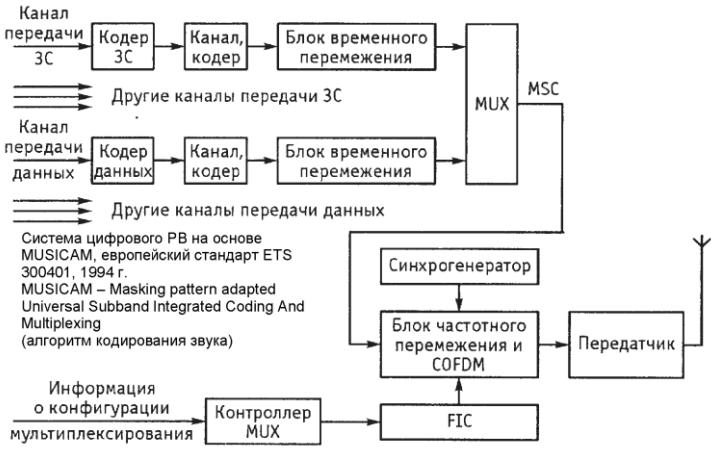


Рис. 6.15. Функциональная схема передающей части системы «Эврика-147»

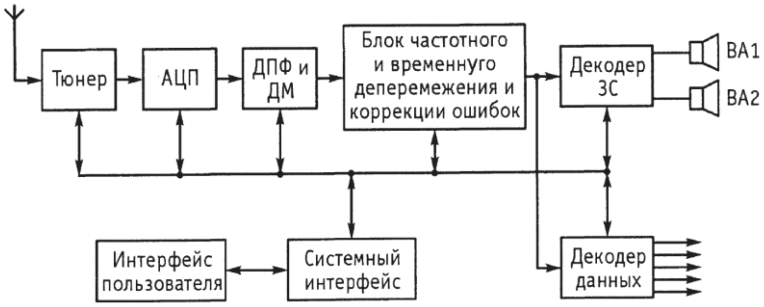


Рис. 6.18. Функциональная схема приемника системы «Эврика-147»

Таблица 4.2. **Основные параметры системы**

Параметры	Режим передачи			
	I	II	III	IV
Номинальный частотный диапазон (для мобильного приема), МГц	≤ 375	≤ 1500	≤ 3000	≤750
Количество несущих, используемых в модеме COFDM	1536	384	192	768
Длительность защитного интервала, мкс	~246	~62	~31	~123
Максимальное разнесение передатчиков при работе в одночастотной сети, км	96	24	12	48
Длительность фрейма передачи, мс	96	24	24	48
Число FIB во фрейме передачи	12	3	4	6
Число CIF во фрейме передачи	4	1	1	2

Таблица 4.1. **Входные сигналы системы**

№ на схеме рис. 4.1	Наименование и состав сигнала	
1	Данные канала FIC (FIDC+MCI+SI)	
2	Данные для управления мультиплексированием сигнала ЦРВ	
3	Информация, передаваемая в канале пользователя	
4	Звуковые программы	Данные, связанные с программой (PAD)
		ИКМ звуковой сигнал ($f_д$=24 или 48 кГц)
5	Общие данные для канала пользователя	Данные пакетного режима
		Данные потокового режима

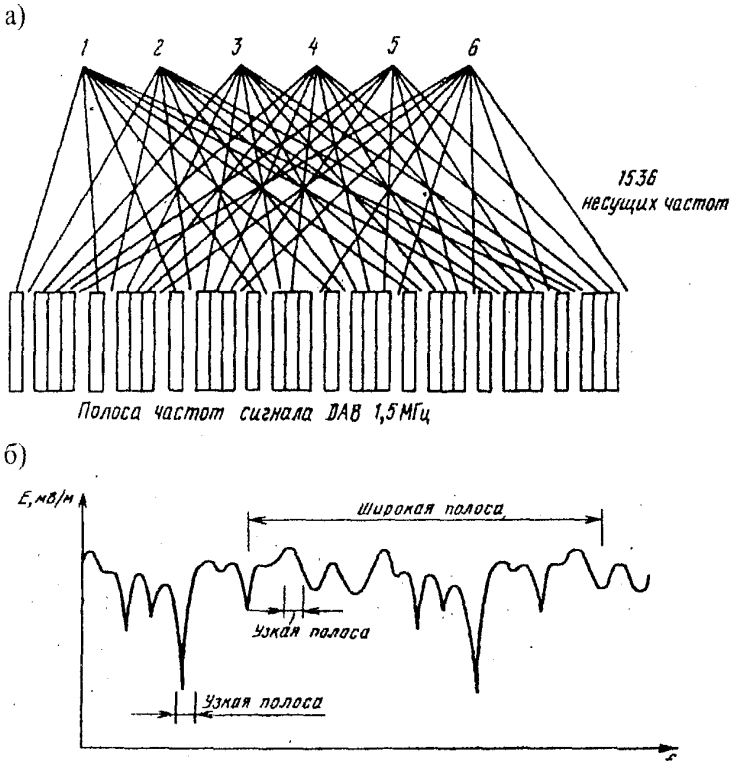


Рис.15.6. Принцип распределения цифровых сигналов вещания по несущим (а) в системе T-DAB и зависимость замираний элекиромагнитного поля в точке приема от частоты (б)

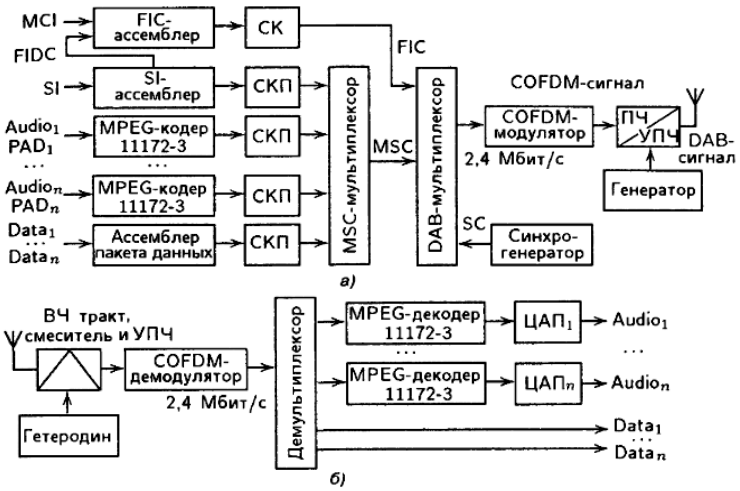


Рис. 18.16. Упрощенные структурные схемы передающей (*а*) приемной (*б*) частей системы DAB: СК — скремблирование и помехоустойчивое кодирование; СКП — скремблирование, помехоустойчивое кодирование и временно́е перемежение

Рис.15.9. Пример построения цикла

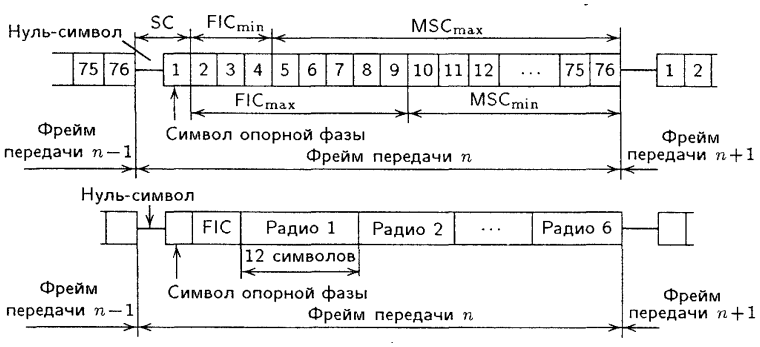


Рис.15.10. Структура фрейма передачи системы DAB в укрупненном виде для режимов работы I и II

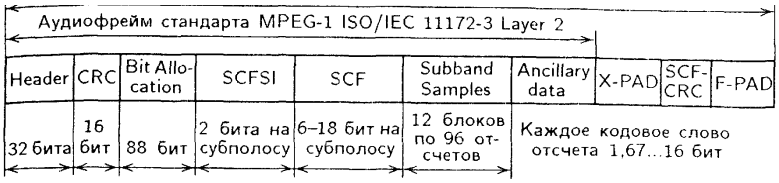


Рис.15.11. Структура данных аудиофрейма системы DAB

Таблица 4.13. **Параметры сигнала передачи системы DAB**

Параметр	Режим передачи			
	I	II	III	IV
L	76	76	153	76
K	1536	384	192	768
T_F	196608 T (96 мс)	49152 T (24 мс)	49152 T (24 мс)	98304 T (48 мс)
T_0	2656 T (1,3 мс)	664 T (324 мкс)	345 T (168 мкс)	1328 T (648 мкс)
T_S	2552 T (1,25 мс)	638 T (312 мкс)	319 T (156 мкс)	1276 T (623 мкс)
T_U	2048 T (1,0 мс)	512 T (250 мкс)	256 T (125 мкс)	1024 T (500 мкс)
$\tau_{защ}$	504 T (246 мкс)	126 T (62 мкс)	63 T (31мкс)	252 T (123 мкс)
$\delta f=1/T_U$, кГц	1	4	8	2
R_k, кГц	1,56	6,25	12,50	3,125
τ_c, мкс	640	160	80	320

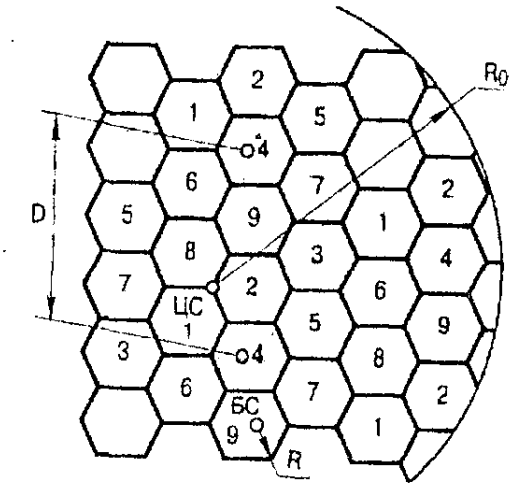


Рис.14.5 Приклад стільникової структури організації мовлення

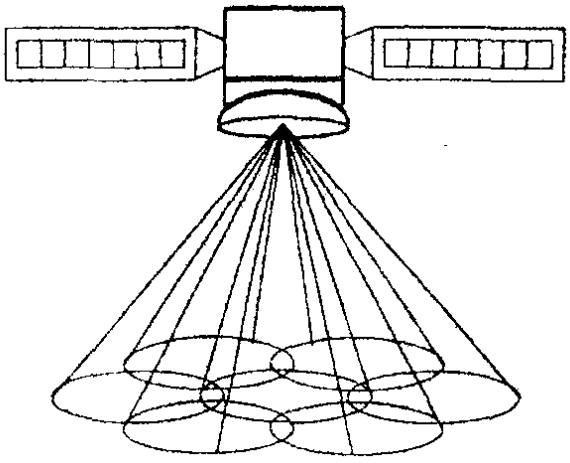


Рис.14.6 Використання багатопроменевої антени ретранслятора на ШСЗ для стільникового покриття території обслуговування

ЛЕКЦІЯ №15 ЦИФРОВЕ РАДІОМОВЛЕННЯ ПО ТЕХНОЛОГІЯМ DRM ТА DRM+

ЛІТЕРАТУРА:

1. Брагин А.С. Технологии вещательных служб. Часть 1. Технологии звукового радиовещания. –К.: НТУУ «КПИ», 2006.
2. Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов./Под ред. Ю. А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком., Радио и связь, 2007. – 872 с.

РОЗДАТНИЙ МАТЕРІАЛ: див. ДОДАТОК Л

1. Загальні характеристики технології DRM

Головна мета авторів стандарту - різко поліпшити якість мовлення на частотах нижче 30 МГц у порівнянні із традиційним аналоговим радіомовленням, особливо в діапазоні декаметрових хвиль. Стандарт дозволяє перевести радіоканал мовлення з розряду чисто інформаційних і «репортерських» (зі смугою звукових частот 5...7 кГц) у розряд художньо-інформаційних.

Консорціум DRM вважає, що для досягнення комерційного успіху цифрова система мовлення повинна задовольняти наступним вимогам:

- більш висока якість звуку й надійність прийому, ніж при аналоговому мовленні, сумісність із частотним планом аналогового мовлення, можливість подальшого розвитку з поступовим переходом від аналогового мовлення до повністю цифрового радіомовлення, максимально можливе використання існуючого передавального встаткування, можливість виробництва дешевих радіоприймачів.

Експериментальне цифрове мовлення в концепції DRM для діапазонів гекто - і декаметрових хвиль із використанням радіопередавачів з амплітудною модуляцією почате в 2002 р.

У форматі DRM передбачається передача цифрового радіосигналу (разом з деяким обсягом цифрових даних незвукового характеру від окремого джерела) у радіоканалі, *суміщеному з каналом аналогового радіомовлення.* Існує до 12 варіантів згаданого сполучення аналогового (у смузі 4,5...5 кГц) і цифрового (у смузі від 4,5 до 10 кГц) сигналів. У тому числі передбачена й однополосна передача цифрового сигналу зі збереженням у суміжній смузі аналогового.

У загальному виді послуга передачі даних являє собою синхронну або асинхронну передачу потоку інформації, файлу або пакета (або серії пакетів) даних. Передача тексту (обсягом 80 біт/с) входить до складу основний DRM - послуги. Вид і обсяг послуг, а також використовуваний діапазон радіочастот, визначають особливості побудови системи.

Основные технические характеристики системы DRM:

Диапазоны частот, МГц	Менее 30
Полосы частот радиоканалов, кГц	4,5; 5; 9; 10; 18; 20
Возможность совместной передачи в одном радиоканале сигналов аналогового радиовещания и DRM-сигналов	Имеется
Виды сигналов, поступающих от поставщиков радиопрограмм	Звуковые сигналы; речевые сигналы; данные
Режимы передачи звуковых сигналов	Стерео, моно
Методы кодирования звуковых сигналов	MPEG-4 AAC; MPEG-4 CELP; MPEG-4 HVXC
Метод расширения диапазонов воспроизводимых звуковых частот	Spectral Band Replication (SBR)
Диапазон скоростей передачи цифровых звуковых (включая речевые) сигналов, кбит/с	2...72
Способы модуляции сигналов	QAM; OFDM
Методы защиты информации от ошибок	Сверточное кодирование; перемежение битов, перемежение QAM-ячеек

2. Передавальна частина технології DRM

Передавальна частина системи DRM показана на рис.15.1. Видно, що в схемі присутні всі обов'язкові елементи передавальної частини системи цифрового радіомовлення. У форматі DRM використовуються три цифрових канали:

- *головний службовий канал користувальницької інформації (MSC)* утримуючий груповий цифровий потік звукової програми й додаткових даних,
- *канал швидкого доступу* (до файлу переданої інформації), що містить інформацію, яку необхідно розшифрувати (демультиплексувати) у приймачі в першу чергу (FAC),
- *канал опису обслуговування (SDC), що* несе інформацію про послуги в загальному потоці даних каналу MSC. З його допомогою можна розшифрувати згадані послуги й знайти додаткові джерела цих даних. Він може також містити елементи одночасної аналогової й цифрової (simulcast) передачі.

Головний службовий канал MSC містить від одного до чотирьох цифрових потоків, кожний з яких несе інформацію про аудіодані або додаткові дані. Кожний потік складається з логічних фреймів тривалістю 400 мс. Цифрові потоки аудіоданих включають компресовані аудіодані і як необов'язковий компонент - дані текстової передачі.

У складі потоків даних може бути до чотирьох субпотоків, складених з пакетів даної однієї послуги.

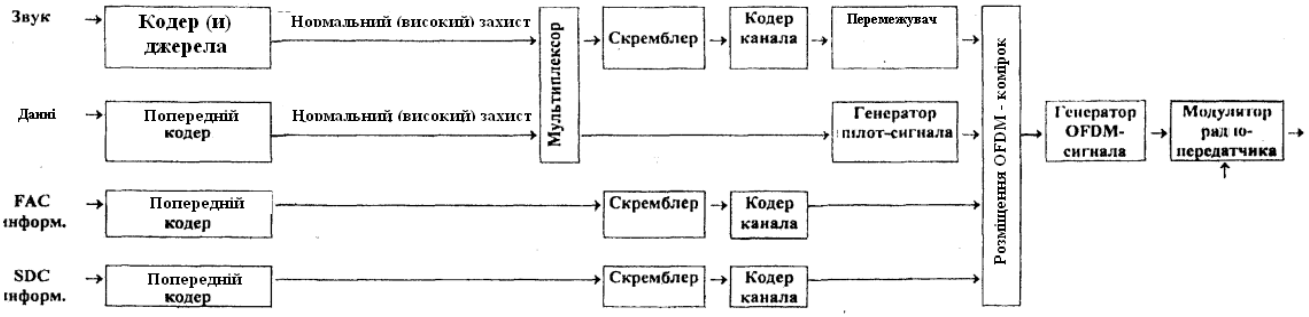


Рис. 15.1. Структура передавальної частини системи DRM

Тут можливі різні комбінації: послуга звукового мовлення може містити один потік аудіоданних і потік (або субпотік) даних, а послуга даних може складатися з одного потоку даних або одного субпотоку даних.

Кожний логічний фрейм, як правило, складається із двох частин, причому кожна зі своїм рівнем захисту від завад. Довжини цих частин встановлюються незалежно. Нерівний захист від помилок усього потоку забезпечується різним рівнем захисту частин логічного фрейму. Логічні фрейми від всіх потоків поєднуються воєдино, щоб сформувати мультиплексний логічний фрейм 400-мілісекундної тривалості.

У свою чергу, багатокомпонентний груповий цифровий потік MSC складається з послідовності мультиплексних фреймів, дані по конфігурації мультиплексування втримуються в каналі опису обслуговування (SDC). Мультиплексування може бути реконфігуровано й передане в границях суперфрейму. Реконфігурація мультиплексування відбувається при зміні параметрів у каналі FAC або у випадку зміни виду послуги. Інформація про нову конфігурацію мультиплексування передається з випередженням за часом по каналу SDC, а під час зміни конфігурації відображається спеціальним індексом реконфігурації в каналі FAC.

Канал швидкого доступу FAC використовується для забезпечення оперативного перегляду інформації про послуги, що надаються системою і початку ефективного декодування цифрового потоку.

Дані про параметри каналу (наприклад, ширина займаного спектра, глибина перемеження) і про послуги, укладених у мультиплексному цифровому потоці, дозволяють декодувати інформацію про послуги в першу чергу.

Кожний переданий фрейм містить у собі FAC-блок, що містить параметри, які характеризують канал і описують одну послугу, а також включають параметри канального кодування CRC. Так, код мови потенційних клієнтів складається із чотирьох біт (16 варіантів), тип звукової програми описаний п'ятьома бітами (32 варіанта) і т.д. У випадку, якщо в мультиплексному потоці втримується більше однієї послуги, то для їхнього опису потрібне більше число FAC-блоків.

Канал опису обслуговування SDC містить інформацію, що дозволяє розшифрувати послуги, що містяться в загальному потоці даних каналу MSC, дає можливість знайти додаткові (альтернативні) джерела тих же самих даних, а також указує ознаки послуг, що містяться в мультиплексному потоці. Обсяг

даних SDC змінюється відповідно до ширини спектра сумарного мультиплексного потоку, а також залежно від інших параметрів. Обсяг даних каналу може бути збільшений при використанні функції переходу на альтернативну частоту (AFS). Такий перехід може здійснюватися без втрати обслуговування зі збереженням всіх даних, які передаються в каналі, якщо ці дані змінюються квазістатично. Виконання цієї умови вимагає ретельного контролю даних в SDC-фреймах. Дані в каналі SDC передаються, як правило, з використанням модуляції 4-КАМ. SDC розглядається як окремий канал даних. SDC-блок містить обсяг даних, що передається в одному суперфреймі передачі. Загальний обсяг даних, необхідних для передачі може перевищувати можливості SDC-блоку. Наявність функції AFS дозволяє розширити можливості шляхом інформування приймача про передачу чергового SDC-блоку й про перехід на альтернативну частоту. Дієвість цієї функції забезпечується FAC-каналом, що передає в приймач інформацію, що підтверджує або заперечує факт зміни частоти. SDC-блок має у своєму складі чотири біти AFS-індексу, n байт (поля) даних і 16 біт завадостійкого коду. Обсяг поля даних залежить від типу робастості (тобто від обраного ступеня стійкості системи до грубих зовнішніх впливів), варіанта (моди) SDC та ширини спектру, що використовується.

3. Режими передачі

Система DRM призначена для використання на будь-якій частоті нижче 30 МГц при врахуванні канальних обмежень і умов поширення радіохвиль, властивих цим діапазонам. Щоб задовольнити цим вимогам, передбачено кілька режимів передачі, які визначаються двома типами параметрів:

-шириною смуги сигналу мовлення,

-параметрами, що визначають ефективність системи для різних моделей середовища РРВ (для кожної моделі існують прийнятні швидкості цифрового потоку).У табл.15.1 показано типове використання рівнів завадостійкості системи, тобто різновидів структури OFDM-символів.

Типові радіомовні канали на частотах нижче 30 МГц характеризуються смугою 9 і 10 кГц. У системі DRM передбачена організація каналів:

- у межах цих номіналів смуги (щоб відповідати існуючим частотним планам),
- у межах половини цих номіналів смуги (тобто 4,5 і 5 кГц, щоб забезпечувати мовлення, сумісне із традиційним аналоговим),
- у межах подвоєних номіналів смуги (18 і 20 кГц для реалізації великої пропускної здатності каналу в тих випадках, коли це допускає частотне планування).

Таблиця 15.1 Типове використання рівнів завадостійкості системи (режимів передачі)

Рівень завадозахищеності системи - тип структури OFDM-символів	**Типові умови РРВ**
A	Гаусівский канал з мінімальними завмираннями
B	Канал із частотно-селективними завмираннями й з більшим запізнюванням
C	Рівень завадостійкості B, але з більшим доплерівським зрушенням частоти
D	Рівень завадостійкості B, але з більшим запізнюванням і більшим доплерівським зрушенням частоти

При будь-якій ширині смуги частот сигналу ефективність передачі визначається компромісом між корисною швидкістю передачі цифрового потоку й стійкістю до шумів, завмиранням і ефекту Доплера. Необхідний рівень завадостійкості диктується умовами РРВ і забезпечується належним вибором параметрів OFDM-символів і, отже, модему COFDM.

Таким чином, параметри OFDM-символів забезпечують різні рівні завадостійкості системи, тобто режими передачі в системі. Для заданої смуги частот різні рівні завадостійкості сигналу припускають різні швидкості передачі даних.

Табл.15.2 містить параметри OFDM-символів для чотирьох рівнів завадостійкості. Тут: $\mathbf{T_u}$ - тривалість корисної (ортогональної) частини OFDM-символу (тобто частини, що виключає захисний інтервал), $\mathbf{1/T_u}$ - частотний інтервал між суміжними несучими, $\mathbf{T_g}$ - тривалість захисного інтервалу, $\mathbf{T_s}$ - тривалість OFDM-символу, $\mathbf{N_s}$ - число OFDM символів у фреймі. Часові інтервали, що характеризують параметри OFDM-символа, виражені в кратних числах елементарного періоду часу T = 1/12000 = 83, 33мкс.

Облік умов РРВ реалізується в перерозподілі тривалостей складових $\mathbf{T_u}$ і $\mathbf{T_g}$ в OFDM-символі. Погіршення умов РРВ приводить до більш ніж дворазового відносного збільшення частки (ваги) захисного інтервалу.

Таблиця 15.2. Параметри OFDM-символів

Рівень завадостійкості	$\mathbf{T_u}$, мс	1/ $\mathbf{T_u}$, *Гц*	$\mathbf{T_g}$, мс	$\mathbf{T_s=T_u+T_g}$	$\mathbf{T_g/T_u}$	$\mathbf{N_s}$
A	24 (288T)	412/3	2,66	26,66 (320T)	1/9	15
B	21,33 (256T)	467/8	5,33 (64T)	26,66 (320T)	1/4	15
C	14,66	682/11	5,33 (64T)	20	4/11	20
D	9,33 (112T)	1071/7	7,33 (88T)	16,66 (200T)	11/14	24

Захисний інтервал являє собою циклічне продовження корисної частини OFDM-символу $\mathbf{T_u}$. OFDM-символи у фреймі передачі нумеруються від 0 до $\mathbf{N_s}$ - 1. Всі символи містять дані й довідкову інформацію. Кожній ширині спектра поставлений у відповідність певний параметр, табл.15.3.

Таблиця 15.3. Параметр «заповнення спектра»

Значення параметра «заповнення спектра»	0	1	2	3	4	5
Ширина смуги частот радіоканалу (по звуковій частоті), кГц	4,5	5	9	10	18	20

Нагадаємо, що в будь-якому режимі роботи системи переданий сигнал складається з послідовності OFDM-символів, кожний з яких - це сума **К** активних несучих, рівномірно розподілених в межах смуги радіоканалу. Кожна несуча (позначається індексом, приписуваним частотному інтервалу $\mathbf{К_{мін}...К_{макс}}$, **К** = 0 відповідає опорній частоті $\mathbf{f_R}$ випромінюваного радіосигналу) модулюється протягом часу $\mathbf{T_s}$ існування одного символу.

У табл.15.4 представлені мінімальний і максимальний індекси (тобто номера) несучих для існуючих режимів завадостійкості й номіналів смуги каналу.

Таблиця 15.4. Відповідність індексів несучим рівням завадостійкості й номіналам смуги частот каналу мовлення

	Індекс несучої	**Значення параметра «заповнення спектра»**					
		0	1	2	3	4	5
A	$К_{мін}$	2	2	-102	-114	-98	-110
	$К_{макс}$	102	114	102	114	314	350
B	$К_{мін}$	1	1	-91	-103	-87	-99

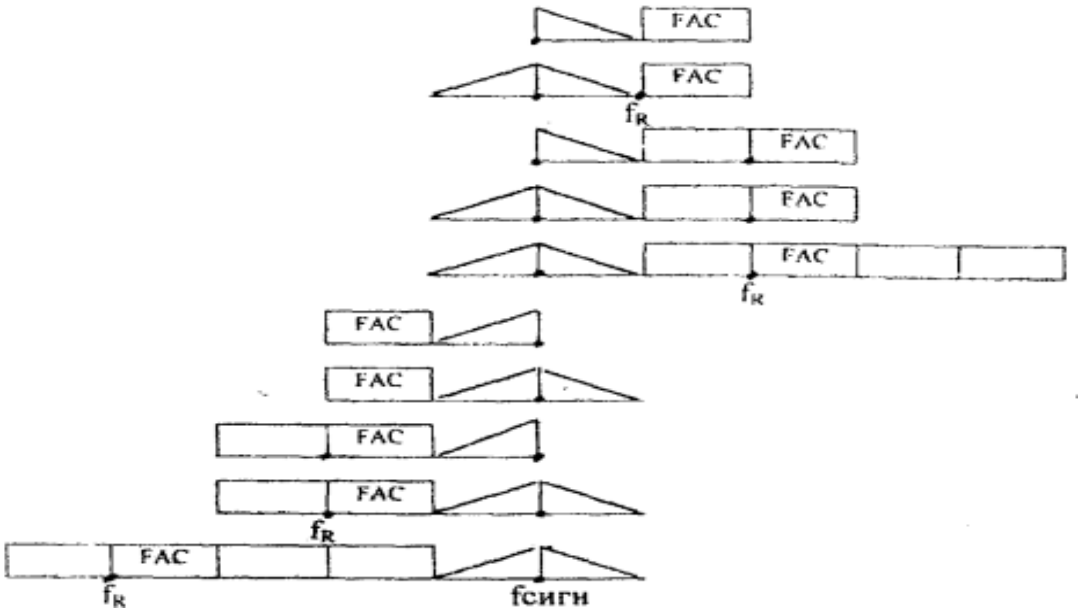
	$К_{макс}$	91	103	91	103	279	311
C	$К_{мін}$	-	-	-	-69	-	-67
	$К_{макс}$	-	-	-	69	-	213
D	$К_{мін}$	-	-	-	-44	-	-43
	$К_{макс}$	-	-	-	44	-	135

Таким чином, параметри OFDM-символу залежать від допустимої смуги радіоканалу, числа несучих **К** и їхньої локалізації відносно опорної частоти випромінювання.

Група частот, відведена під FAC-канал, завжди праворуч відносно опорної частоти випромінювання $\mathbf{f_R}$, тобто вище останньої. Вона займає смугу, чисельно кратну значенню 1 кГц.

Система DRM розроблялася для використання в смузі мовлення аналогового радіомовлення з амплітудною модуляцією. Одночасну (аналого-цифрову) передачу як послугу, що використовує DRM і аналогове мовлення, можуть представляти розташовані поруч по частоті аналоговий сигнал (як однополосний - SSB, із частково ослабленою другою бічною смугою - VSB, двухполосний - DSB) і цифровий сигнал системи DRM.

Можливі варіанти використання одного передавача для спільної (simulcast) передачі сигналів аналогового й цифрового мовлення відбивають діаграми, рис. 15.2.



$\mathbf{f_R}$ - опорна частота DRM-сигналу; $\mathbf{f_{сигн}}$ - несуча частота аналогового сигналу; FAC-група несучих, що містять FAC-комірки; трикутники символізують аналоговий сигнал, а прямокутники - несучі OFDM-сигналу

Рис.15.2 Варіанти спільної аналого-цифрової передачі на частотній осі

Номінал опорної частоти DRM повинен бути кратний 1 кГц, а опорна частота **f** і $\mathbf{f_{сигн}}$ повинні бути рознесені на 4 або 5 кГц.

Цифровий транспортний потік переданого сигналу організований (структурований) у суперфрейми передачі.

Суперфрейм (суперкадр) DRM містить дані трьох каналів, MSC, FAC, і SDC, організованих у три OFDM-фрейми передачі, рис.15.3.

Комірки FAC, включені в кожний фрейм передачі використовуються для швидкого одержання в приймачі інформації, необхідної для стійкої демодуляції DRM-сигналу. Усього використовується 65 FAC комірки. У каналі FAC використовується маніпуляція 4-QAM.

Комірки SDC повторюються в кожному суперфреймі передачі та містять додаткову інформацію для опису надаваної в цей момент послуги (а також для альтернативного перемикання частоти - функція AFS). Для передачі SDC-чарунок можливе використання маніпуляції 4-QAM або 16-QAM.

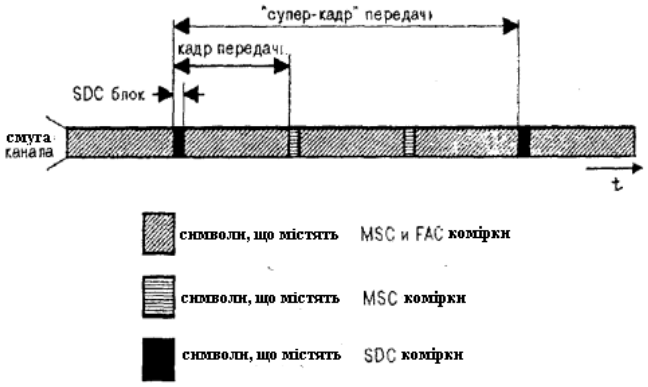


Рис. 15.3 Структура суперфрейму DRM

У каналі MSC використовується маніпуляція 16-QAM або 64-QAM. На рис. 15.4 для ілюстрації наведений амплітудно-фазовий простір для 64-QAM.

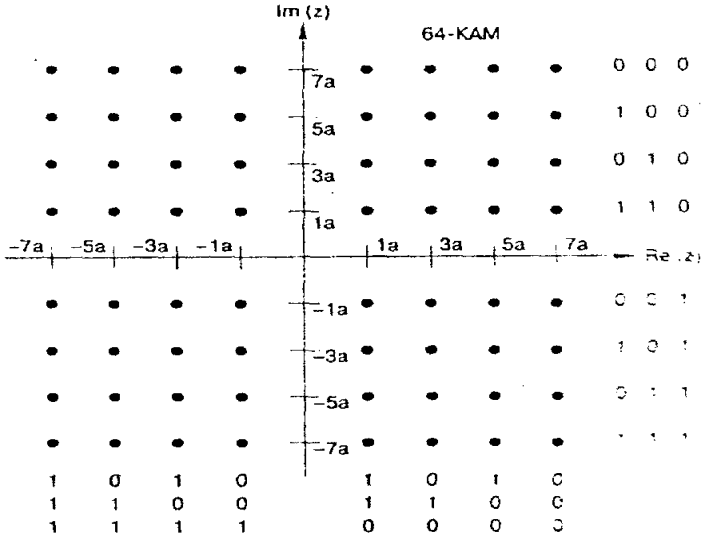


Рис. 15.4. Амплітудно-фазовий простір 64-QAM

4. Кодування первинних цифрових мовних сигналів в системі DRM. Концепція SBR

Радіомовним каналам у діапазоні частот нижче 30 МГц властиві обмеження швидкості передачі цифрової інформації. З урахуванням параметрів кодування й маніпуляції швидкість цифрового потоку на виході кодера джерела повинна перебувати в межах від 8 кбіт/с (вузькополосні напівканали) до приблизно 20 кбітс (стандартні канали) або 72 кбіт/с (подвійні канали). Для забезпечення згаданих швидкостей передбачені різні алгоритми кодування джерела звукової програми:

- **MPEG-4 AAC** - перспективне звукове (поліпшене) кодування (дослівно), що включає засоби підвищення завадостійкості для універсального моно- і стереофонічного радіомовлення; швидкість цифрового потоку може бути довільної, однак вона повинна мінятися із кроком 20 біт/с, щоб забезпечити вирівнювання 400-мілісекундного цифрового суперфрейму; частота дискретизації 12 або 24 кГц;

MPEG-4 CELP кодер мови із засобами підвищення завадостійкості для монофонічного радіомовлення, коли потрібно або дуже низька швидкість передачі даних, або дуже висока завадостійкість; стандарт охоплює стиснення і розшифровку природного звуку мови із цифровими швидкостями передачі від 4 до 24 кбит/с; це відомий алгоритм кодування (широко застосовується в системах мобільного зв'язку) з новими функціональними можливостями, оптимізованими для різних прикладних програм; працює із двома номіналами частоти дискретизації 8 і 16 кГц (відповідно для смуг кодуємого звукового сигналу 100 ... 3800 Гц і 50 ... 7000 Гц);

- **MPEG-4 HVXC** - кодер мови, що забезпечує дуже низьку цифрову швидкість передачі (2 і 4 кбіт/с; повна швидкість із урахуванням завадостійкого кодування становить відповідно 2,4 і 4,66 кбіт/с) і високу завадостійкість монофонічного радіомовлення, особливо при підвищених вимогах до якості передачі мови, близькому до якості міжнародного телефонного зв'язку (смуга звукових частот 100 ... 3800 Гц і частота дискретизації 8 кГц);

- **SBR** - спеціальний прийом підвищення ефективності звукового кодування, що дозволяє передавати високочастотну частину звукової смуги з низькою швидкістю; він застосовний при використанні AAC і CELP.

Щоб підтримувати розумну якість відтворення при низьких цифрових швидкостях, доводиться обмежувати смугу звукових частот і працювати з низькою частотою дискретизації. Забезпечувати розширену смугу звукових частот при низької швидкості передачі дозволяє SBR-кодування.

Воно досягається за рахунок специфічного «розщеплення» смуги частот звукового сигналу на дві частини.

Відзначимо, що якісне звучання характеризується передачею порівняно широкополосного звукового сигналу (наприклад, з верхньою частотою до 1 0 кГц). Обмеження ширини смуги частот такого сигналу еквівалентно її усіканню, рис.15.5.

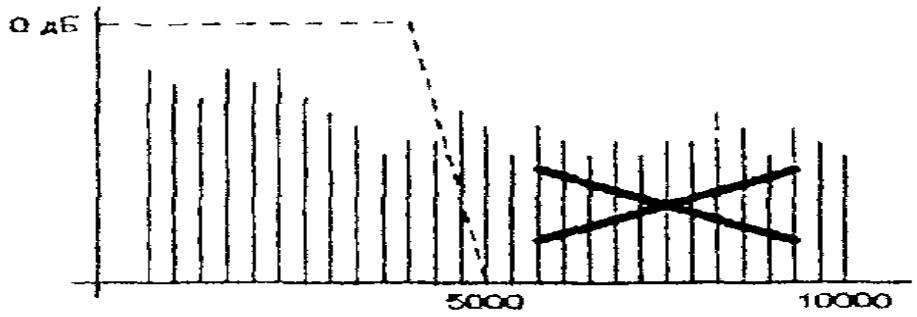


Рис. 15.5. Усікання смуги частот звукового сигналу при SBR

Подібне усікання змінює сприйманий тембр і «приглушає» звуки сигналу, роблячи їх «тьмяними». Може навіть погіршитися розбірливість мови. В основі концепції SBR лежить постулат*, що усічена смуга на прийомному кінці може - бути розширена на основі відомого співвідношення між низькочастотними й високочастотними компонентами спектра.*

Алгоритм SBR відбиває рис.15.6.

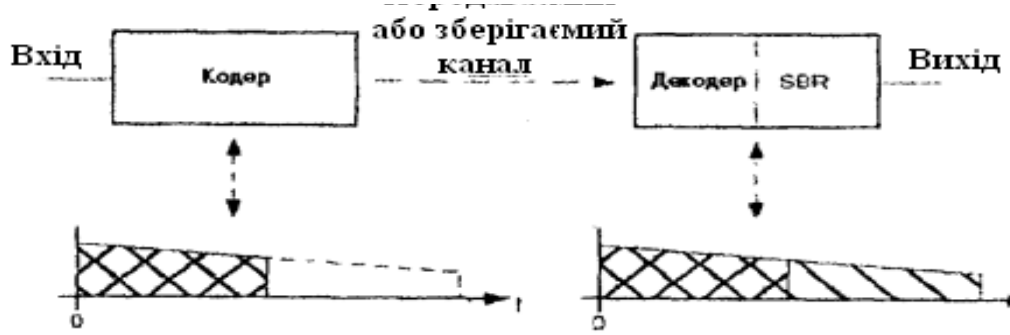


Рис.15.6 До пояснення алгоритму SBR

«Скопійована» високочастотна частина спектра повинна бути досить схожа на відповідну частину спектра вихідного сигналу, а інформація про неї (тобто ознаки цієї частини, а не сам спектр) повинні впевнено передаватися від кодера до декодувального пристрою в дуже низькошвидкісному потоці даних (приблизно 2 кбіт/с). *При цьому важливо зберегти вихідні пропорції між гармонічними (обертони) і шумоподібними компонентами в скопійованій високочастотній частині спектра й, якщо необхідно, ці шумові компоненти вибірково додати до «скопійованого» сигналу*.

SBR-кодування відновлює високочастотну частину смуги звукових частот, що губиться при кодуванні через обмеженість номіналу частоти дискретизації. Щоб реалізувати викладену ідею, необхідно передати на прийомну сторону деякий обсяг додаткової інформації, використовуючи для цього малу частку загального цифрового потоку кодера джерела. Ці додаткові дані обчислюються на вихідному (широкополосному) звуковому сигналі (до його кодування) і використовуються для відновлення повноцінного (з первісною широкою смугою) звукового сигналу після процедури декодування джерела. Цей алгоритм може поліпшити характеристики вузькополосних кодеків мовних сигналів, пропонуючи радіомовним компаніям 12-кілогерцову звукову смугу,

що може бути, наприклад, використана для багатомовного мовлення. SBR-Кодування підвищує якість прийнятої мови і її розбірливість. Таким чином, поділ смуги спектра (SBR) є ще одним додатковим інструментом для зменшення швидкості передачі цифрового мовлення.

5. Радіоприймач системи DRM

Концептуальная структурная схема тракта приема цифровых сигналов радиоприемника системы DRM представлена на рис. 18.42. Радиосигнал системы DRM, поступающий из ненаправленной приемной антенны, выделяется в блоке тюнера, после чего направляется на вход демодулятора OFDM. С выхода данного устройства сигнал поступает на инверсный преобразователь OFDM-ячеек, на выходе которого восстанавливаются по отдельности каналы MSC, FAC и SDC. В канале MSC производится деперемежение QAM-ячеек. Далее осуществляется канальная демодуляция, т.е. обратное преобразование QAM-ячеек и исправление ошибок, возникших при передаче сигнала DRM по реальному каналу связи. После этого производится дерандомизация цифровых сигналов, передаваемых в каналах MSC, FAC и SDC. Затем выполняется демультиплексирование MSC, т.е. разделение мультиплексированного потока на отдельные звуковые (речевые) каналы или каналы данных. Цифровые потоки, передаваемые в них, декодируются в предназначенных для этого декодерах. Информация, передаваемая в каналах данных, может

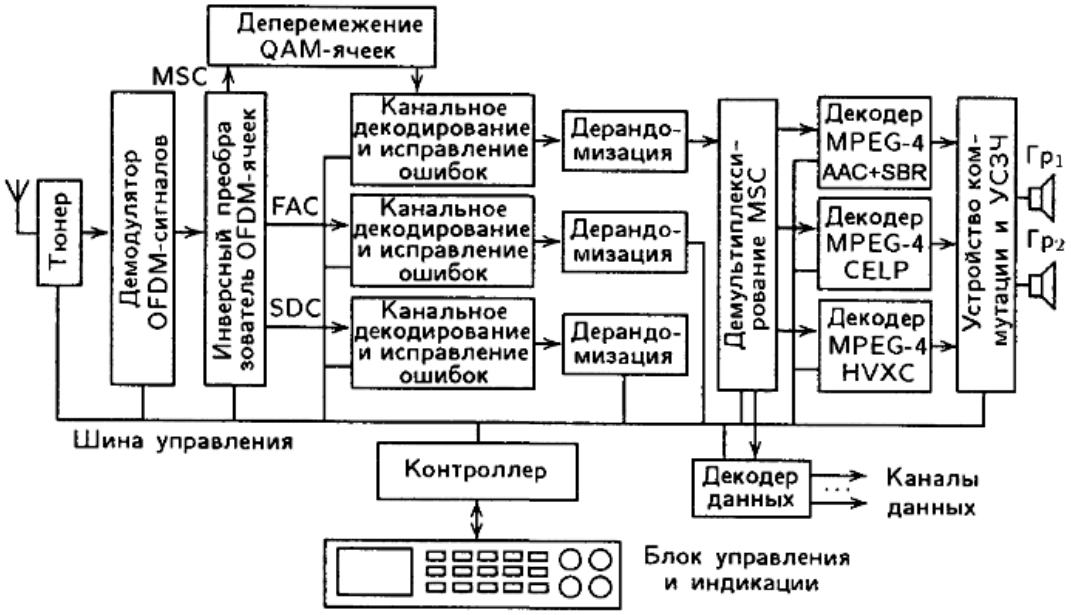


Рис. 18.42. Концептуальная структурная схема тракта приема цифровых сигналов радиоприемника системы DRM

отображаться на дисплее пользователя и/или поступать на выход приемника для дальнейшего использования. Системный контроллер соединен с блоком управления и индикации. Он управляет приемником в соответствии с командами пользователя и информацией, передаваемой в каналах FAC и SDC.

6. Система радіомовлення DRM+

Система DRM+ это расширение стандарта DRM на частоты ОВЧ - диапазона. Новая система использует логическую структуру и существующие наработки стандарта DRM, изменены только параметры OFDM-модуляции для ширины полосы 100 кГц [1].

Для совместимости с большинством распределений частот в ОВЧ - диапазоне ширина полосы DRM+ сигнала составляет около 100 кГц.

На рис. 1 показана диаграмма ОВЧ спектра, в котором размещен спектр радиосигналов аналоговых ОВЧ-ЧМ станций FM1 и FM2 и спектр радиосигналов станции ОВЧ DRM+.

Ширина спектра в системе DRM+ составляет около 96 кГц, что дает возможность передавать до 4 – 8 стереопрограмм.

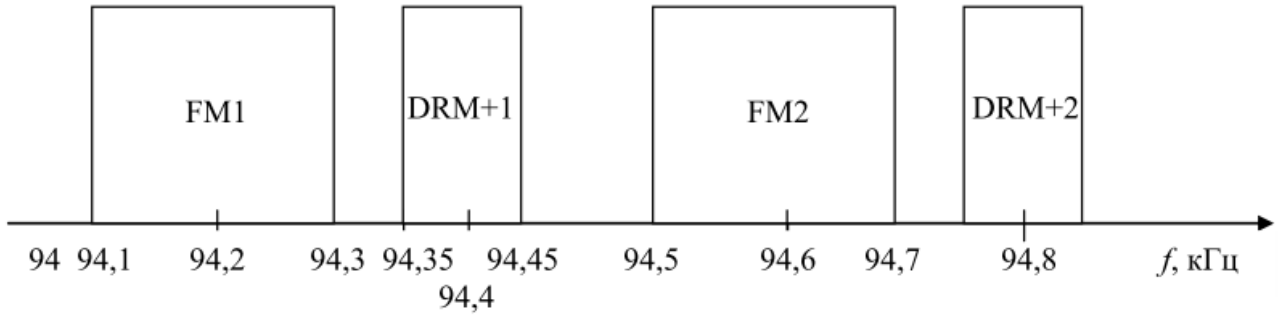


Рисунок 1 – Диаграммы ОВЧ спектра

Для формирования цифрового сигнала в системе DRM+ используется модуляция OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex – мультиплексирование ортогонально разделенных несущих).

OFDM сигнал можно записать как:

$$S(nT) = \mathrm{Re}\left[\sum_{k=0}^{N-1} C_k \exp(j2\pi kn/N)\right], n = 0, 1, \ldots, N-1, \ \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

где C_k – информационный параметр, $N = T_u/T$, T_u – длительность полезной части OFDM символа, $T = 1/F$– тактовый интервал, F –тактовая частота, n – номер отсчета.

Если в соответствии с формулой обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ) выполнить вычисление вещественной и мнимой частей, а затем осуществить цифро-

аналоговые преобразования, то получим следующее выражение:

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_{Ik} \cos(2\pi f_k t) - \sum_{k=0}^{N-1} C_{Qk} \sin(2\pi f_k t) = I(t) - Q(t), \qquad (2)$$

где $f_k = f_0 + \frac{k}{T_s}$, f_0 – граничная частота. Частота f_k представляет собой k-ую гармонику основной частоты $1/T_s$, то есть величины, обратной длительности полезной части символа и равной расстоянию между частотами соседних несущих. $Q(t)$ – мнимая часть (квадратурная составляющая), $I(t)$ – вещественная часть (синфазная составляющая).

Если после вычисления вещественной $I(t)$ и мнимой $Q(t)$ частей (ОДПФ) умножить вещественную (синфазную) часть на колебание cos $2\pi ft$, а мнимую (квадратурную) на колебание sin $2\pi ft$, то при суммировании произведений получим OFDM радиосигнал, смещенный по частоте на значение f.

$$S(t) = I(t)\cos 2\pi ft - Q(t)\sin 2\pi ft. \qquad (3)$$

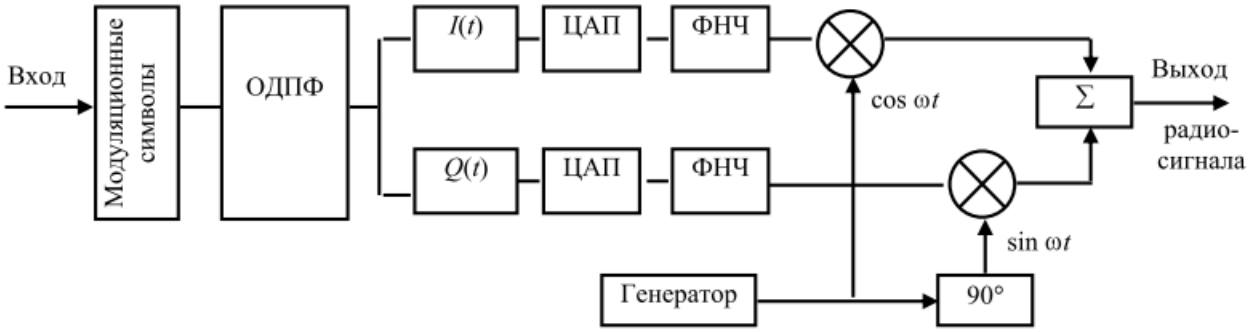


Рисунок 2 – Структурная схема модулятора OFDM

Таким образом, в системе DRM+ цифровые радиосигналы формируются на выходе модулятора OFDM (рис. 2).

$$U_ц = U_0[I(t)\cos\omega t - Q(t)\sin\omega t]. \qquad (4)$$

На входе цифрового приемника сигналы от синхронных передатчиков П1 и П2 суммируются:

$$U_{\Sigma ц}(t) = U_{ц1}(t) + U_{ц2}(t-\tau) = U_{01}\{I(t)\cos\omega t - Q(t)\sin\omega t + D[I(t-T)\cos\omega(t-\tau) - Q(t-T)\sin\omega(t-\tau)]\}. \qquad (5)$$

где $D = \frac{U_{02}}{U_{01}}$,

$T = \tau + \tau_0$,

τ – разность времени пробега электромагнитных волн от радиовещательных станций к месту приема,

τ_0 – временная разность прихода цифровых модулирующих сигналов на входы модуляторов передатчиков П1 и П2.

Для уверенного разделения символов OFDM при одновременном радиоприеме сигналов от разных передатчиков, работающих в синхронной сети, между ними имеется так называемый "защитный интервал" длительностью T_g (рис. 3).

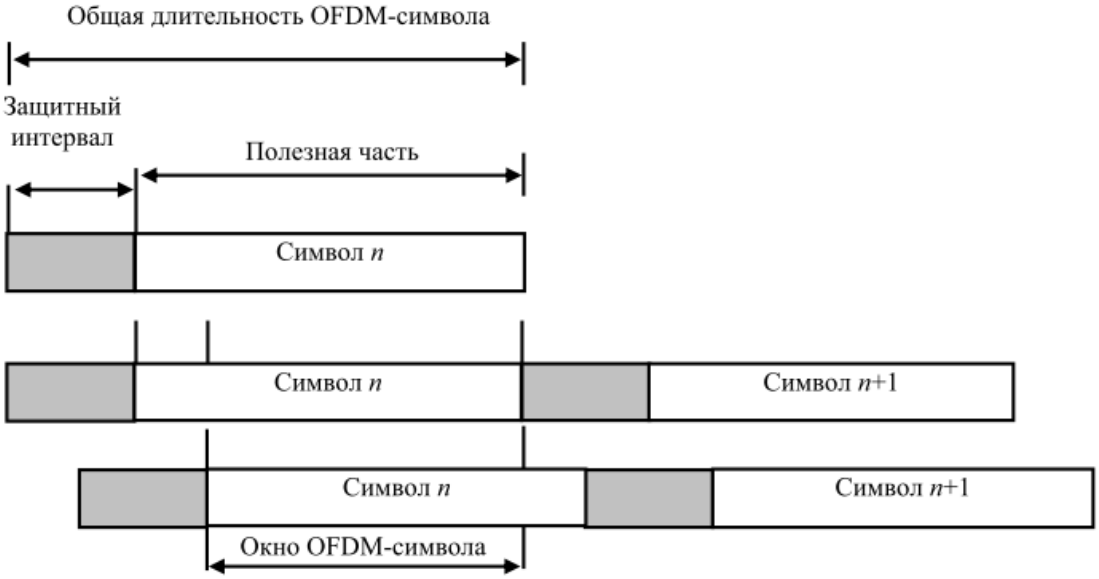


Рисунок 3 – К вопросу о защитном интервале OFDM символа

Выражение (5) представляет собой сумму двух OFDM символов перенесенных в область радиочастот.

Если $T < T_g$, то мощности символов OFDM конструктивно складываются [2], поэтому в приемнике радиосигнал OFDM будет обрабатываться при напряжении:

$$U_{\Sigma ц}(t) = U_{01}\sqrt{(1+D^2)}\ [I(t)\cos\omega t - Q(t)\sin\omega t]$$

Питання для самоконтролю

1. Дайте загальну характеристику концепції створення цифрового радіомовлення стандарту DRM.
2. Аргументуйте доцільність чотирьох режимів передачі в стандарті DRM.
3. Аргументуйте можливі варіанти спільної аналого-цифрової передачі сигналів радіомовлення.
4. Аргументуйте доцільність алгоритму SBR-Кодування джерела звукових сигналів.
5. Дайте характеристику стандарту DRM+.

ДОДАТОК Л. РИСУНКИ ДО ЛЕКЦІЇ №15

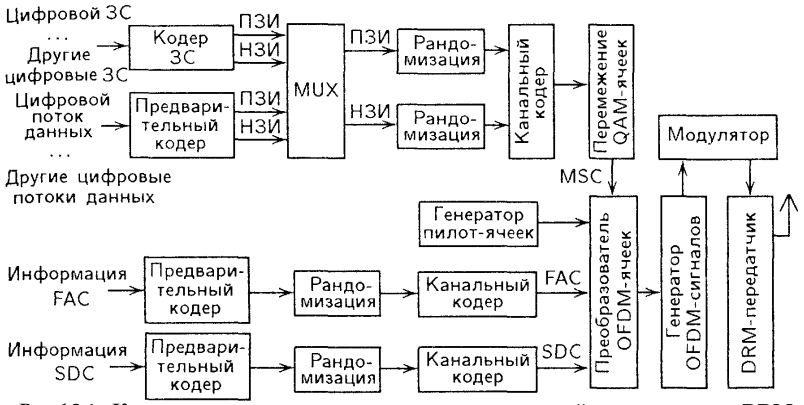


Рис.16.1. Концептуальная структурная схема передающей части системы DRM: ПЗИ – повышенная защита информации; НЗИ – нормальная защита информации

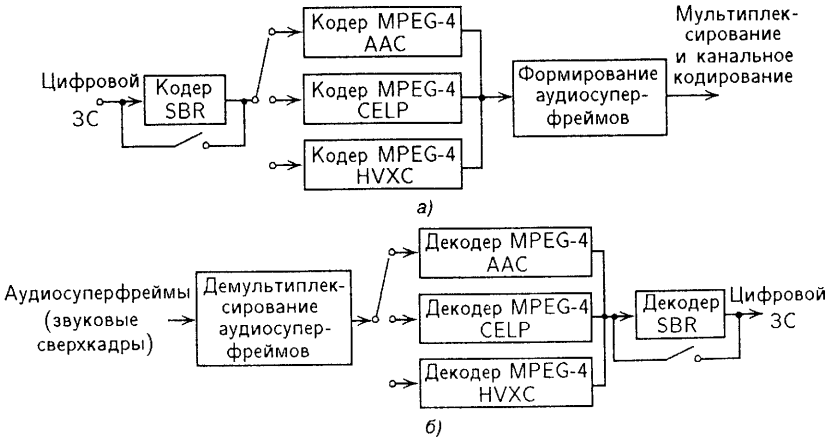


Рис.16.2. Иллюстрации методов кодирования (а) и декодирования (б) цифровых звуковых (речевых) сигналов в системе DRM

Рис. 16.3. Пример построения аудиосуперфрейма при использовании метода MPEG-4 AAC для случая передачи стереофонического сигнала

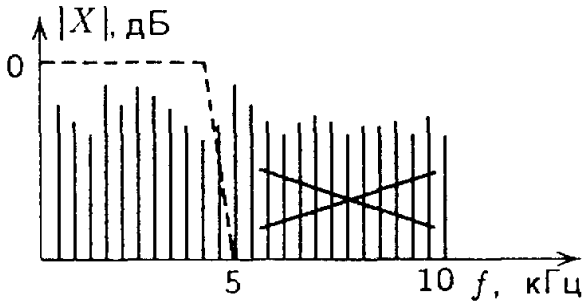


Рис.16.4. Пример подавления высокочастотных составляющих в спектре

Основные технические характеристики системы DRM:

Диапазоны частот, МГц	Менее 30
Полосы частот радиоканалов, кГц	4,5; 5; 9; 10; 18; 20
Возможность совместной передачи в одном радиоканале сигналов аналогового радиовещания и DRM-сигналов	Имеется
Виды сигналов, поступающих от поставщиков радиопрограмм	Звуковые сигналы; речевые сигналы; данные
Режимы передачи звуковых сигналов	Стерео, моно
Методы кодирования звуковых сигналов	MPEG-4 AAC; MPEG-4 CELP; MPEG-4 HVXC
Метод расширения диапазонов воспроизводимых звуковых частот	Spectral Band Replication (SBR)
Диапазон скоростей передачи цифровых звуковых (включая речевые) сигналов, кбит/с	2...72
Способы модуляции сигналов	QAM; OFDM
Методы защиты информации от ошибок	Сверточное кодирование; перемежение битов, перемежение QAM-ячеек

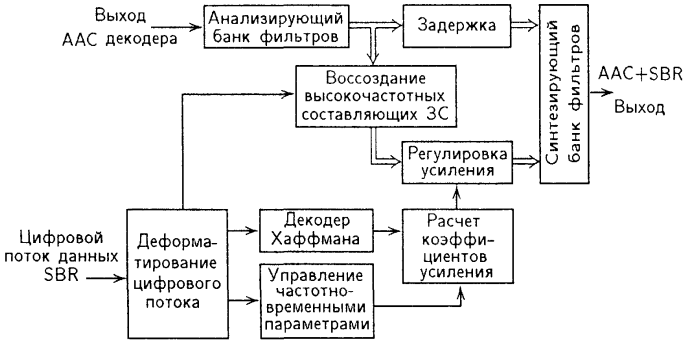


Рис.16.6. Структурная схема, поясняющая процесс декодирования звуковых сигналов при использовании методов кодирования MPEG-4 AAC и SBR

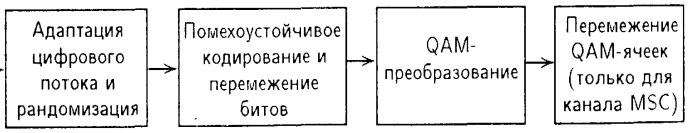


Рис.16.7. Концептуальная схема кодирования информации в каналах MSC, FAC и SDC

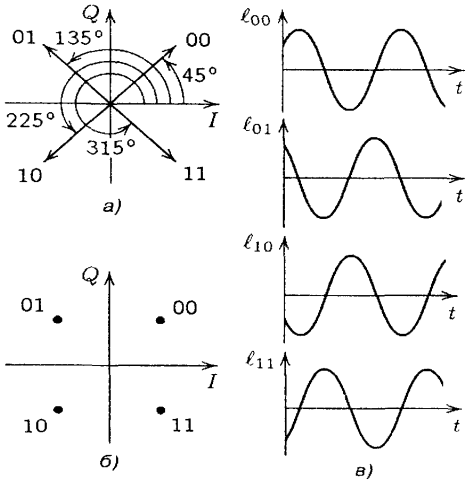


Рис.16.8. Иллюстрации преобразования 4-QAM (QPSK): *а, б* **– векторные диаграммы; в – временные зависимости**

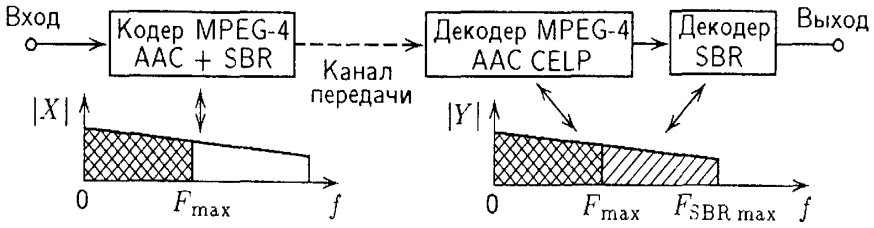


Рис.16.5. Иллюстрация принципов кодирования и декодирования цифровых звуковых сигналов при использовании методов MPEG-4 AAC и SBR

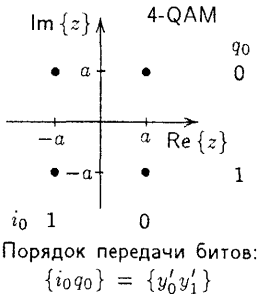


Рис.16.9 Применяемое в системе DRM преобразование 4-QAM и соответствующие сочетания битов: a – нормирующий коэффициент; z – комплексный символ модуляции; y'_0, y'_1 – биты, представляющие z, $a = 1/\sqrt{2}$

Скорость передачи ЗС, кбит/с 22
Длительность звукового кадра, мс 40
Частота дискретизации MPEG-4 AAC, кГц 24
Частота дискретизации SBR, кГц 48
Частотный диапазон ЗС при применении MPEG-4 AAC, кГц ..... 0...6
Частотный диапазон ЗС за счет применения SBR, кГц ..... 6...15,2
Средняя скорость цифрового потока SBR на канал, кбит/с 2

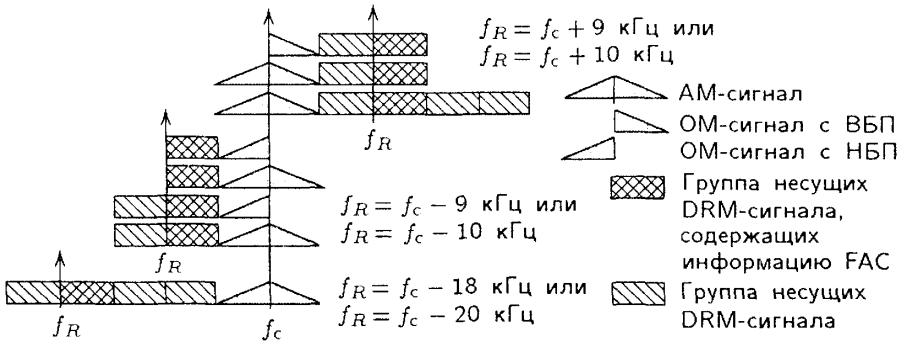


Рис.16.11 Примеры изображений спектров, формируемых при одновременной передаче сигналов аналогового радиовещания и DRM-сигналов; сдвиг между несущими частотами аналоговых сигналов (f_c) и опорными частотами DRM-сигналов (f_R) равен: 9, 10, -18, -20 кГц

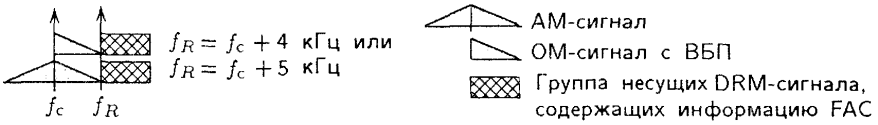


Рис.16.12 Примеры изображений спектров, формируемых при одновременной передаче сигналов аналогового радиовещания и DRM-сигналов; сдвиг между несущими частотами аналоговых сигналов (f_c) и опорными частотами DRM-сигналов (f_R) равен 4 или 5 кГц

Таблица 18.3

Режим устойчивости	Условия распространения радиосигналов
A	Гауссовские каналы с малыми замираниями
B	Каналы с замираниями, имеющие частотную и временну́ю селективнсть, с увеличенными задержками распространения сигналов
C	Аналогично режиму B, но с увеличенным эффектом Доплера
D	Аналогично режиму B, но с существенными задержками распространения сигналов и значительным эффектом Доплера

Таблица 18.4

Параметр	Режим устойчивости			
	A	B	C	D
Элементарный временно́й период T, мкс	83 1/3	83 1/3	83 1/3	83 1/3
Длительность используемой части символа OFDM T_u, мс	24 ($288T$)	21 1/3 ($256T$)	14 2/3 ($176T$)	9 1/3 ($112T$)
Длительность защитного интервала символа символа OFDM T_g, мс	2 2/3 ($32T$)	5 1/3 ($64T$)	5 1/3 ($64T$)	7 1/3 ($88T$)
Отношение длительностей защитного интервала и используемой части символа OFDM T_g/T_u	1/9	1/4	4/11	11/14
Длительность символа OFDM $T_s = T_u + T_g$, мс	26 2/3	26 2/3	20	16 2/3
Разнос несущих частот $1/T_u$, Гц	41 2/3	46 7/8	68 2/11	107 1/7
Длительность фрейма передачи T_{rmF}, мс	400	400	400	400
Количество символов в фрейме передачи N_s	15	15	20	24

Таблица 18.5

Режим устойчивости	Минимальный и максимальный номер несущей частоты	Индекс ширины полосы частот 0	1	2	3	4	5
A	K_{min}	2	2	-102	-114	-98	-110
	K_{max}	102	114	102	114	314	350
B	K_{min}	1	1	-91	-103	-87	-99
	K_{max}	91	103	91	103	279	311
C	K_{min}	-	-	-	-69	-	-67
	K_{max}	-	-	-	69	-	213
D	K_{min}	-	-	-	-44	-	-43
	K_{max}	-	-	-	44	-	135

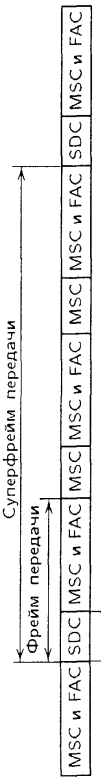


Рис.16.13 Временное размещение информации MSC, FAC и SDC в суперфрейме

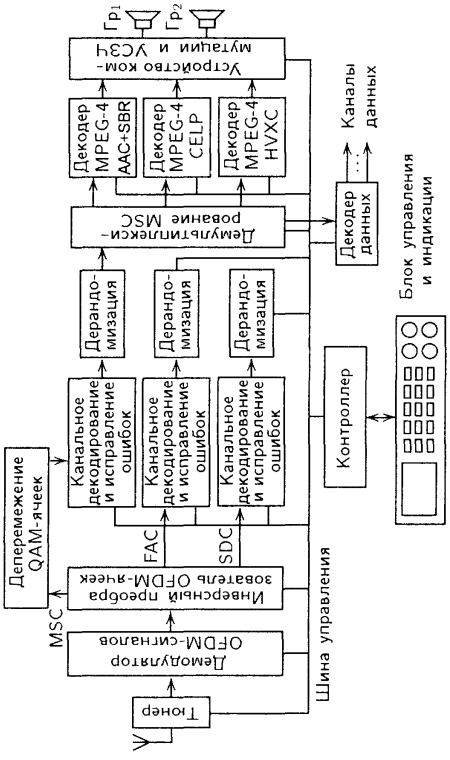


Рис.16.14. Концептуальная структурная схема тракта приема цифровых сигналов радиоприемника системы DRM

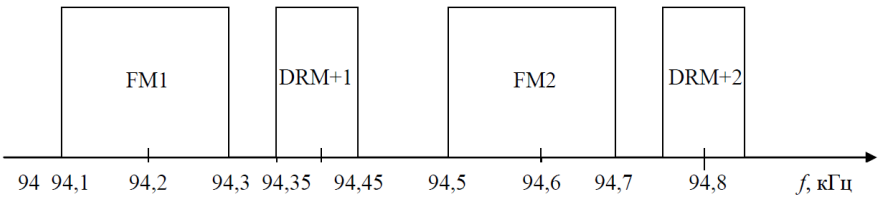


Рис.16.15. Спектр диапазона УКВ с использованием DRM+