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

Ю. О. Головін,
Д. І. Могилевич

ОСНОВИ ТЕОРІЇ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Спеціальні телекомунікаційні системи»
спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка

Електронне мережне навчальне видання

Видання друге (доповнене)

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Рецензенти *Креденцер Б.П.,* д.т.н., професор, провідний науковий співробітник НДЦ НЦЗІ Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Василенко С. В., к.т.н., начальник науково-дослідної спеціальної лабораторії №2 Науково-дослідного центру ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Кононова І. В.,* к.т.н., доцент

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 7 від 27.04.2-23 р.)
за поданням Вченої ради ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 10 від 30.03.2023 р.)

Містить базові поняття, які визначають побудову та функціонування систем радіозв'язку, особливості радіочастотних діапазонів, певні аспекти електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів. Викладено основні принципи побудови передавальних та приймальних пристроїв радіозв’язку на рівні структурних схем їх елементів і принципів функціонування, основні характеристики радіообладнання. Наведено особливості функціонування систем аналогового та цифрового радіо- та телемовлення. В кожному підрозділі запропоновані питання та практичні завдання для самоконтролю засвоєння матеріалу.

Навчальний посібник розроблено відповідно до програми навчальної дисципліни «Основи радіозв’язку» та призначений для здобувачів ступеня *бакалавр* за спеціальністю 172 *Електронні комунікації та радіотехніка*, буде також корисним для здобувачів інших спеціальностей при опануванні радіотехнологій.

Реєстр. № НП 22/23-626. Обсяг 9,2 авт. арк.

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

© Ю. О. Головін, Д. І. Могилевич
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023

ЗМІСТ

стор.

Перелік умовних скорочень 4
Вступ 7
РОЗДІЛ 1. Загальні відомості про радіозв'язок
1.1. Принципи організації радіозв'язку 8
1.2. Радіочастотний діапазон і його використання для радіозв'язку 14
1.3. Управління використанням радіочастотного ресурсу 22
1.4. Види радіосигналів в системах радіозв'язку 27
1.5. Електромагнітна сумісність радіоелектронних засобів 38
РОЗДІЛ 2. Основи побудови радіопередавальних пристроїв
2.1. Структура і основні характеристики радіопередавачів 48
2.2. Загальні принципи побудови збуджувачів радіопередавачів 53
2.3. Способи формування діапазону робочих частот 61
2.4. Формування радіосигналів 75
2.5. Підсилювачі потужності радіопередавачів 86
2.6. Узгоджувальні пристрої радіопередавачів 102
РОЗДІЛ 3. Основи побудови радіоприймальних пристроїв
3.1. Загальні відомості про радіоприймальні пристрої 109
3.2. Радіоприймачі систем радіозв'язку 112
3.3. Коефіцієнт шуму та чутливість радіоприймачів 120
3.4. Односигнальна та багатосигнальна вибірковість радіоприймачів 127
3.5. Особливості та характеристики основних систем і трактів радіоприймачів 134
3.6. Вхідні ланцюги радіоприймачів 142
3.7. Підсилювачі радіочастоти 148
3.8. Тракти проміжних частот радіоприймачів 152
3.9. Індивідуальні тракти приймання сигналів 163
3.10. SDR-приймачі 172
РОЗДІЛ 4. Принципи побудови систем теле- та радіомовлення
4.1. Системи аналогового звукового мовлення 177
4.2. Стандарти стереофонічного звукового мовлення 186
4.3. Системи цифрового звукового мовлення 198
4.4. Особливості систем телемовлення 213
4.5. Системи кольорового телебачення 223
4.6. Особливість цифрового представлення сигналів зображення та звуку 231
4.7. Стандарти цифрового телевізійного мовлення *DVB* 239
4.8. Мережі розподілу сигналів телевізійного мовлення 242
Список використаних джерел 248

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АГ – автогенератор
АД – амплітудний детектор
АМ (АМн) – амплітудна модуляція (маніпуляція)
АМК – амплітудно-модульоване коливання
АО – амплітудний обмежувач
АПЧ – автоматичне підстроювання частоти
АРП – автоматичне регулювання підсилення
АТ – амплітудна телеграфія
АУП – антенний узгоджувальний пристрій
АФП – антенно-фідерний пристрій
АФС – антенно-фідерна система
АЦП – аналого-цифрове перетворення
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика
БГШ – білий гаусівський шум
БМ – балансний модулятор
ВЛ – вхідний ланцюг
ВФМн – відносно фазова маніпуляція
ВЧ – високі частоти
ГЗЗ – генератором із зовнішнім збудженням
ГП – генератор під несівної (частоти)
ДЗКД – дільник частоти зі змінним коефіцієнтом ділення
ДКП – дискретне косинус-перетворення
ДП – диференційний підсилювач
ДСІ – дані сервісної інформації
ДХ – довгі хвилі
ДЧ – дільник частот
ДЧТ – двоканальна частотна телеграфія
ЕКСП – експандер
ЕМО – електромагнітна обстановка
ЕМС – електромагнітна сумісність
ЕРС – електрорушійна сила
ЗБ – з загальною базою
ЗЕ – з загальним емітером
ЗМ – змішувач
ЗТП – загальний тракт прийому
ІКМ – імпульсно-кодова модуляція
ІФАПЧ – імпульсно-фазове автоматичне підстроювання частоти
ІФД – імпульсно-фазовий детектор
КА – космічний апарат
ККД – коефіцієнт корисної дії
КМПР – компресор
КР – кадрова розгортка
КХ – короткі хвилі

ЛБХ – лампи біжучої хвилі
ЛЗ – лінія затримки
ЛПП – ланцюг придушення піднесівної
МЗЧ – максимально застосована частота
НЕ – нелінійний елемент
НЗЗ – негативний зворотній зв'язок
НКВТ – нерівномірний квантувач
ОГ – опорний генератор
ОМ – односмугова модуляція
ПЕС – первинний електричний сигнал
ПЗЧ – підсилювач звукової частоти
ПП – підсилювач потужності
ППрЧ – підсилювач проміжної частоти
ПРЧ – підсилювач радіочастоти
ПТВС – повний телевізійний сигнал
РВП – радіо випромінюючий пристрій
РЕ – реактивний елемент
РЕЗ – радіоелектронні засоби
РКВТ – рівномірне квантування
РМ – радіомовлення
РПП – радіо передавальний пристрій
РР – рядкова розгортка
РРП – ручне регулювання підсилення
РСТ – радіостанція
РТПС – радіотелевізійна передавальна станція
РХ – радіохвиля
РЧР – радіочастотний ресурс
РЧС – радіочастотний спектр
СГ– селектори гармонік
СГ – синхронний гетеродин
СК – спеціальний користувач
СРП – сумарно-різницевий перетворювач
СФ – смуговий фільтр
СХ – середні хвилі
ТБ – телебачення
ТБПЯ – телебачення підвищеної якості
ТЗЧ – тракт звукової частоти
ТКЄ – температурний коефіцієнт ємності
ТПЧ – тракт проміжної частоти
ТРЧ – тракт радіочастоти
УКХ – ультра короткі хвилі
ФАПЧ – фазове автопідстроювання частоти
ФД – фазовий детектор
ФЗВ – фільтр зосередженої вибірковості

ФЛ – фільтруючий ланцюг
ФНЧ – фільтр нижніх частот
ФО – фазообертач
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач
ЧАПЧ – частотне автопідстроювання частоти
ЧД – частотні детектори
ЧМ (ЧМн) – частотна модуляція (маніпуляція)
ЧМЗ – частотно-модульований збуджувач
ЧТ – частотна телеграфія

ВСТУП

Сталий розвиток сучасного суспільства супроводжується зростанням інформаційних потоків, що потребує застосування сучасних електронних комунікацій. Після винаходу радіо в кінці XIX сторіччя, що дозволило передавати інформацію у просторі за допомогою радіохвиль, радіозв'язок набув широкого застосування для передачі мови, зображення та інших даних.

Появі радіозв'язку сприяли теоретичні основи та експериментальні дослідження, які були розроблені та проведені такими відомими винахідниками, як М. Фарадей, Дж. Максвелл, Г. Герц, О. Попов, Г. Марконі та іншими. Подальший розвиток радіозв'язку був пов'язаний з новими схемо-технічними рішеннями та розробками в галузі елементної бази, яка пройшла великий шлях від електронно-вакуумних ламп до напівпровідникових пристроїв і сучасних інтегральних мікросхем високої щільності. Удосконалювалися і методи обробки сигналів, що дозволило перейти в радіозв'язку від аналогових до цифрових технологій.

Зараз області застосування радіозв'язку дуже різноманітні, це – мобільний, стільниковий, супутниковий, радіорелейний зв'язок, радіолокація, радіонавігація, теле- та радіомовлення тощо.

В даному навчальному посібнику викладено основні теоретичні принципи побудови та практичні аспекти функціонування та застосування передавальних та приймальних пристроїв радіозв’язку, розглянуто особливості радіочастотних діапазонів та деякі аспекти електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів, надані базові основи аналогового та цифрового радіо- і телемовлення. Наданий матеріал спрямований на формування у здобувачів вмінь аналізувати структурні та функціональні схеми окремих елементів та засобів радіозв’язку, визначати та аналізувати вимоги до засобів та систем радіозв’язку, що дозволить засвоювати базові зразки засобів радіозв’язку та самостійно опанувати новітні радіотехнології.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РАДІОЗВ'ЯЗОК

1.1. Принципи організації радіозв'язку

Загальні положення

Під ***інформацією*** *розуміють сукупність відомостей про події, явища або предмети, які призначені для передачі, прийому, обробки, перетворення, зберігання або безпосереднього використання.*

Засновник теорії інформації К. Е. Шеннон образно її визначив наступним чином: «*Інформація – це послання, яке зменшує невизначеність*». У широкому сенсі *інформацією можна назвати сукупність знань про навколишній світ*.

Інформацію, що підлягає передачі і виражена в певній формі, називають ***повідомленням***. Повідомлення може бути представлено у формі тексту, телеграми, слова, зображення або цифрового потоку даних. Повідомлення на відстань може бути передано за допомогою матеріального носія. В системах зв'язку в якості носія повідомлень використовуються ***електричні сигнали,*** що змінюються в часі (рис.1.1).

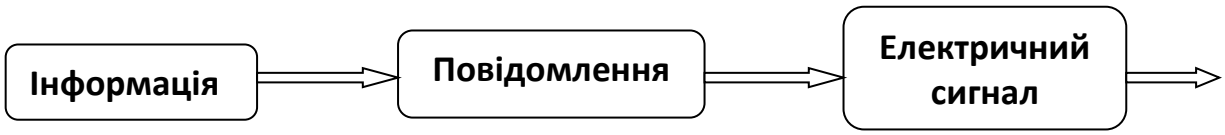


Рис. 1.1 – Формування носія повідомлення

Сукупність технічних засобів, призначених для передачі повідомлень від джерела до споживача, називається ***системою зв'язку.***

Будь-яка система зв'язку складається з *передавального, приймального пристроїв та фізичного середовища*, по якому передаються електричні сигнали з повідомленнями (рис.1.2). Залежно від середовища поширення електричних сигналів розрізняють *проводові та радіосистеми*.

Рис. 1.2 – Елементи системи зв'язку

Структура системи радіозв'язку

Радіозв'язок – електронні комунікації, що здійснюються з використанням радіочастотного спектра [7].

Для передачі повідомлень за допомогою радіохвиль використовують системи радіозв'язку, найпростіша з яких зображена на рис.1.3.

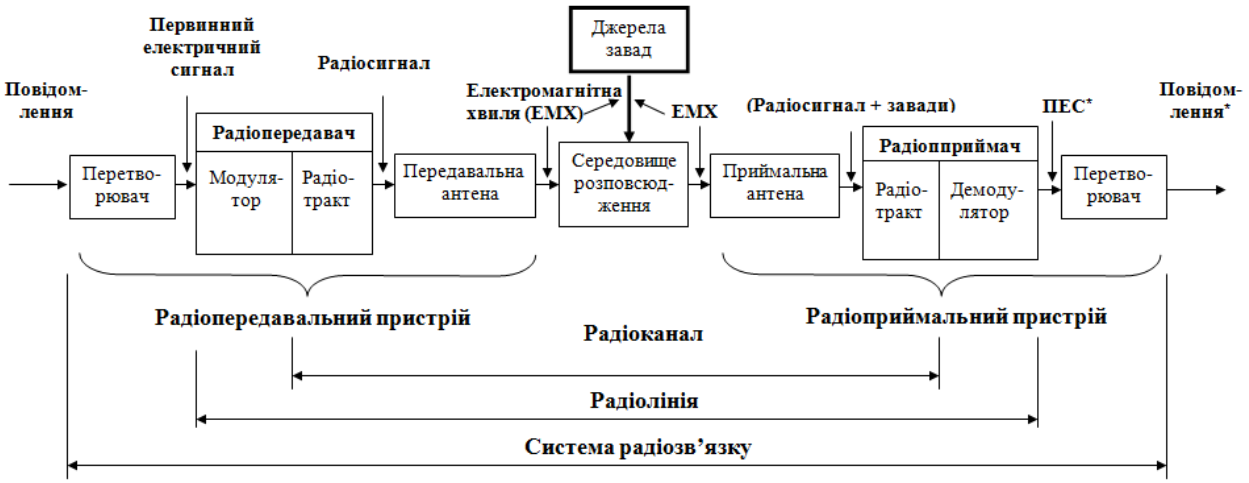


Рис.1.3 – Система радіозв'язку

Система радіозв'язку *складається з радіопередавального і радіоприймального пристроїв, а також з середовища розповсюдження радіохвиль*.

До складу радіопередавального пристрою входять: перетворювач, радіопередавач та антена (антено-фідерна система).

Перетворювач перетворює повідомлення в первинний електричний сигнал (ПЕС), параметри якого (амплітуда, частота або фаза) змінюються по закону інформаційного параметра сигналу повідомлення.

Радіопередавач забезпечує перетворення первинного сигналу у високочастотний радіосигнал необхідної потужності. Радіосигнал формується модулятором і являє собою високочастотні коливання, один або декілька параметрів якого змінюються по закону зміни інформаційного параметра первинного сигналу. В радіотракті здійснюється підсилення сигналу до необхідного рівня потужності.

Антена перетворює високочастотні коливання сигналу в електромагнітні хвилі – радіохвилі.

В радіоприймальному пристрої здійснюється зворотне перетворення сигналу та його підсилення. Крім цього в радіоприймачі придушуються завади, які діють в антені від різних джерел.

На рис.1.3 видно, з яких елементів складається *радіоканал* (канал радіозв'язку) і *радіолінія* (лінія радіозв'язку).

Радіолінія може бути *одноканальною* і *багатоканальною.* В останньому випадку радіопередавальний пристрій містить декілька перетворювачів повідомлень (кінцевих пристроїв), пристрій ущільнення сигналів, а в

модуляторі формується багатоканальний (груповий) сигнал. В демодуляторі радіоприймального пристрою груповий сигнал розділюється на канальні сигнали, які подаються на канальні перетворювачі, тобто приймальні кінцеві пристрої.

Особливості радіоканалу

Навколишнє середовище впливає на характер розповсюдження радіохвиль (РХ). Цей вплив призводить до наступного:

- ослаблення енергії РХ;
- зміни швидкості та напрямку розповсюдження РХ;
- спотворення переданих сигналів;
- повороту площини поляризації РХ тощо.

Середовищем розповсюдження радіохвиль може бути (див. рис.1.6):

- земна поверхня;
- нижня (приземна) та верхня частини атмосфери, що називаються, відповідно, тропосферою та іоносферою;
- космічне середовище.

Умови розповсюдження визначаються багатьма факторами, врахувати які в сукупності досить складно. Тому на практиці часто виділяють ті фактори, що мають вирішальне значення і нехтують іншими. Електромагнітне поле р/хвиль, що випромінюються передавальною антеною, в точці прийому може утворитися внаслідок наступних фізичних процесів:

- розповсюдження РХ в межах прямої видимості між передавальною та приймальною антенами (прямі хвилі);
- дифракції РХ (огинання перешкод), в тому числі, і за лінію горизонту;
- відбиття РХ від землі та інших перешкод на її поверхні, шарів іоносфери тощо.

Атмосфера Землі по різному пропускає РХ різної довжини (λ). Електромагнітні коливання одних частот проходять через атмосферу майже без втрат, в той час, коли для коливань інших частот вона – непрозора.

Властивості каналу радіозв'язку визначаються в основному середовищем розповсюдження радіохвиль:

1) *канал радіозв'язку має велике затухання*, яке досягає 140…160 дБ (наприклад, при потужності сигналу в антені передавача 10^3 Вт на вході приймальної частини каналу потужність сигналу може дорівнювати величин порядку 10^{-11}…10^{-13} Вт);

2) *затухання каналу радіозв'язку не є постійним*, а змінюється в широких межах – 100…160 дБ (в КХ діапазоні завмирання сигналу

обумовлено зміною параметрів атмосфери та іоносфери, а також інтерференцією радіохвиль в точці прийому, а в УКХ діапазоні під час зв'язку рухомих абонентів затухання каналу може змінюватися внаслідок багатопроменевого розповсюдження, зміни відстані зв'язку та рельєфу місцевості тощо);

3) канал радіозв'язку, обмежений лише середовищем розповсюдження радіохвиль, є *фізично загальним для усіх діючих радіосистем*, а можливість їх одночасної роботи закладено в частотному розподілі сигналів, але неминучі взаємні завади, особливо у діапазоні КХ;

4) внаслідок недосконалості радіозасобів, які крім *основного* випромінюють і *небажані коливання,* що призводить до взаємних завад;

5) на якість радіозв'язку впливають також *завади природного* і *промислового походження*, які охоплюють значну частину радіочастотного діапазону.

Крім корисного сигналу на вході приймального пристрою завжди діють радіозавади, які погіршують якість радіозв'язку. В загальному випадку спотворений завадами сигнал можливо представити наступною функцією:

$$u(t) = f[v(t), n(t)],$$

де v(t) – корисний сигнал на виході передавача;
n(t) – завади.

За своєю дією радіозавади поділяють на *адитивні (*лінійний процес додавання сигналу і завади) і *мультиплікативні (*нелінійна взаємодія сигналу і завади). Така взаємодія може бути як на трасі розповсюдження РХ, так і в трактах засобів радіозв'язку.

Адитивні завади поділяють на *флуктуаційні, імпульсні і синусоїдальні*.

Флуктуаційні завади - це внутрішні шуми приймача, а також шуми середовища поширення сигналу (лінії зв'язку). Їх спектр зазвичай набагато ширше смуги пропускання приймача, тому флуктуаційну заваду часто розглядають як адитивний білий гаусівський шум (БГШ).

Імпульсні завади представляють собою неперіодичну послідовність одиночних радіоімпульсів різної форми. Вони створюються атмосферними та промисловими джерелами завад, а в окремих випадках і іншими системами зв'язку.

Синусоїдальними завадами є зосереджені по спектру завади, ширина спектра яких мала в порівнянні зі смугою пропускання приймача. Джерелами таких завад є станції навмисних завад, генератори високої частоти, радіостанції еталонних частот тощо. До синусоїдальних можна віднести і комбінаційні завади всередині самого приймача.

Види радіозв'язку

Системи радіозв'язку за особливостями механізму розповсюдження радіохвиль, побудови та використання поділяють на:

- системи іоносферного радіозв'язку;
- системи радіорелейного зв'язку;
- системи тропосферного зв'язку;
- системи супутникового зв'язку.

В подальшому будемо розглядати особливості побудови систем сухопутного *іоносферного радіозв'язку*.

Мережі прямого радіозв'язку (без використання базових станцій) будуються в основному за двома принципами:

- *радіомережа* (рис. 1.4,а) – декілька кореспондентів мають можливість зв'язку кожного з кожним;
- *радіонапрямок* (рис. 1.4,б) – працюють лише два кореспонденти.

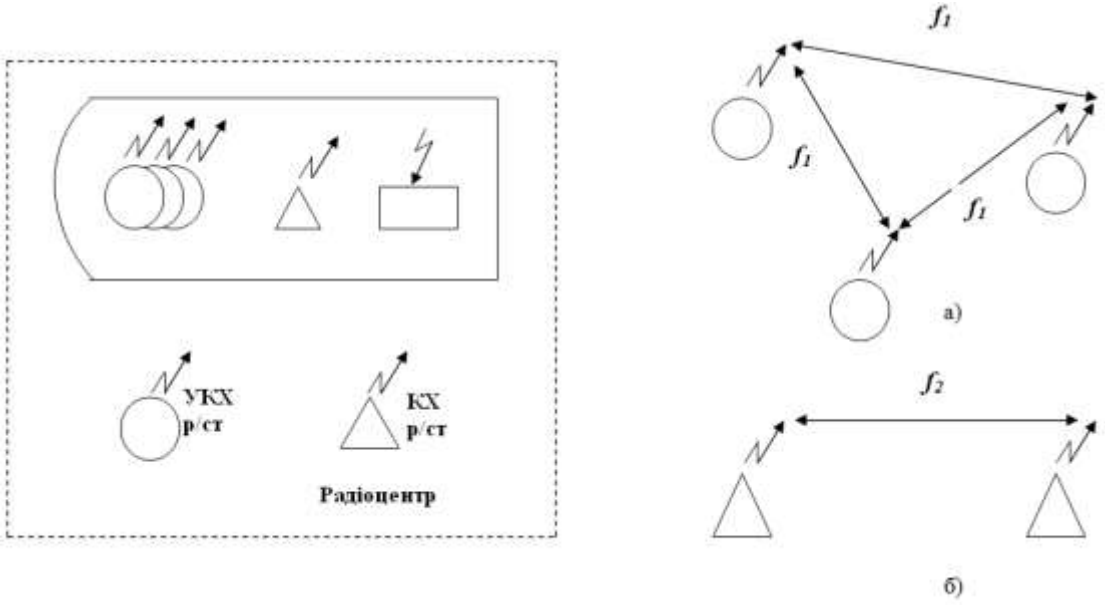


Рис.1.4 – Способи організації радіозв'язку

Зв'язок між кореспондентами може здійснюватися *безпосередньо* або *через базову станцію*.

Якщо для передачі та прийому радіосигналів в радіостанції використовується один фізичний канал і цей процес можливий тільки почергово, то така радіостанція називається ***симплексною*** (рис.1.5,а). В ***дуплексній*** радіостанції двосторонній радіозв'язок (прийом-передача) можливий одночасно з використанням двох окремих фізичних каналів (рис. 1.5,б).

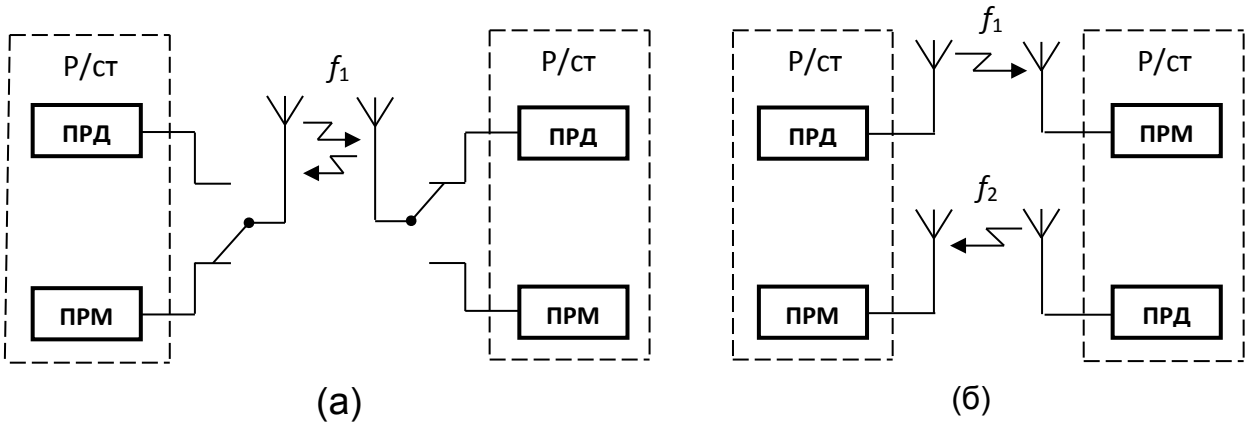


Рис. 1.5 – Принцип роботи симплексних і дуплексних радіостанцій

В сучасних системи радіозв'язку передаються різноманітні повідомлення, використовуються різні принципи побудови, режими роботи, способи модуляції та кодування тощо. Відповідно вони можуть бути класифіковані за багатьма ознаками.

За *призначенням переданих повідомлень* розрізняють наступні типи радіосистем:

– телефонні – призначені для передачі мови;

– телеграфні – призначені для передачі тексту;

– фототелеграфні (факсимільні) – призначені для передачі нерухомих зображень;

– телевізійні – призначені для передачі зображень;

– радіомовні – призначені для передачі програм радіомовлення;

– телеметричні – призначені для передачі вимірювальної інформації;

– системи телеуправління, призначені для передачі команд управління;

– системи передачі даних – призначені для обслуговування автоматизованих систем управління тощо.

Контрольні запитання

1. З яких основних елементів складається система радіозв’язку та які їх призначення?
2. В чому полягає особливість радіоканалу?
3. Які бувають види радіозавад, як вони взаємодіють з корисним сигналом?
4. Які існують види радіозв’язку та в чому полягають їх особливості?
5. Чим відрізняється дуплексний радіозв’язок від симплексного?
6. Яким чином радіосистеми класифікуються за призначенням?

1.2. Радіочастотний діапазон і його використання для радіозв'язку

Діапазони радіочастот

Як правило, електричні сигнали, які безпосередньо відображають повідомлення є низькочастотними. Такі сигнали в радіозв'язку називають *первинними електричними сигналами* (ПЕС), наприклад, для передачі мовного повідомлення сигнал обмежують спектром 0,3…3,4 кГц.

Передавати сигнали низьких частот безпосередньо можна тільки по проводовим лініям зв'язку. Такі сигнали не можуть ефективно випромінюватися у вільний простір, що обумовлено:

– необхідністю частотного розподілу каналів для різних абонентів;

– потребою великих розмірів передавальних і приймальних антен (розміри антен залежать від довжини хвилі випромінювання (λ));

– наявністю промислових завад в низькочастотному діапазоні тощо.

Для передачі інформації без проводів використовують спеціальні електричні коливання, які називаються ***несівними***. Несівні коливання не містять інформації, але добре випромінюються і поширюються у вільному просторі. Тому за їх допомогою інформація, що представлена в первинному сигналі, переноситься у вільному просторі:

$$U(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi)$$

Інформація закладається в один (або декілька) із параметрів несівного коливання: амплітуду (U_m), частоту (ω) або фазу (φ), які змінюються по закону первинного сигналу. Це визначається методом модуляції.

Електричні коливання в системах радіозв'язку передаються у вільному просторі за допомогою ***електромагнітних коливань*** у певному діапазоні частот. Взагалі для радіозв'язку використовується спектр частот від $3 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^{12}$ Гц, який називається **областю радіочастот** або **радіочастотним спектром (РЧС).** Отже, *радіохвилі* – це електромагнітні хвилі, частоти яких нижчі за 3000 ГГц, що поширюються у просторі без штучного хвилеводу [7].

Вся область радіочастот поділяється на **діапазони** таким чином, що *властивості розповсюдження радіохвиль в межах одного діапазону практично однакові*.

В табл.1.1 приведені основні діапазони радіочастот та приклади їх використання в різних радіосистемах.

Діапазони № 8 та № 9 відносять до *ультра коротких хвиль* (УКХ).

Таблиця 1.1 – Радіочастотні діапазони

Умовн. № діапа-зону	**Назва хвиль/частот**	**Довжина хвиль(λ), м**	**Частота (f)**	**Приклади використання**
5	Кілометрові або довгі хвилі (ДХ) –***LW*** / низькі частоти (НЧ) – ***LF***	1000–10000	**(30–300) кГц**	Зв'язок з підводними човнами, підземний зв'язок
6	Гектометрові або середні хвилі (СХ)–***MW***/ середні частоти(СЧ) – ***MF***	100–1000	**(0,3–3) МГц**	Радіо-мовлення
7	Декаметрові або короткі хвилі (КХ) –***SW***/ високі частоти (ВЧ) – ***HF***	10–100	**(3–30) МГц**	Радіозв'язок на трасах великої протяжно-сті, радіо-мовлення
8	Метрові хвилі (МХ)/ дуже високі частоти (ДВЧ) – ***VHF***	1–10	**(30–300) МГц**	Теле-, радіо-мовлення, професійний радіозв'язок, транкінговий зв'язок
9	Дециметрові хвилі (ДМХ)/ ультрависокі частоти (УВЧ) – ***UHF***	0,1–1	**(300–3000) МГц**	Радіорелей-ний, тропос-ферний та стільниковий зв'язок, професійний радіозв'язок

Вибір діапазону радіочастот для зв'язку залежить від ряду факторів:

- призначення радіосистеми;
- довжини траси (дальності) зв'язку;
- канальної ємності;
- вимог до якості передачі інформації, економічних витрат на зв'язок тощо.

Передача інформації за допомогою електромагнітних хвиль використовується в радіосистемах різного призначення:

- професійних системах радіозв'язку;
- радіомовленні та телебаченні;
- в системах радіорелейного, тропосферного і космічного зв'язку;
- в системах стільникового зв'язку;
- в системах безпроводової передачі даних тощо.

Основними особливостями радіозв'язку є:

- висока мобільність;

– швидке розгортання та встановлення зв’язку;
– достатньо висока надійність.

РЧС у межах діапазонів, які нині використовуються, повністю розподілений. При цьому враховані особливості поширення радіохвиль, які обумовлені як частотним діапазоном, так і географічним розміщенням РЕЗ.

У відповідності з Регламентом радіозв'язку земна куля поділена на три райони:

– 1-й район – віднесені Європа, Африка, Монголія, частина Азії (Аравійський півострів, Туреччина, частина Ірану) та держави, що входили до складу СРСР (в тому числі Україна);

– 2-й район включає до себе Північну та Південну Америку й Гренландію;

– 3-й району – Австралія, Океанія та частина Азії за винятком держав, які входять до 1-го району.

Далі основна увага буде приділена сухопутному іоносферному радіозв’язку, тому розглянемо більш детально особливості основних діапазонів радіочастот для нього, а саме – діапазони № 7, 8 та 9.

Особливості використання декаметрових (коротких) хвиль в радіозв’язку

В декаметровому діапазоні радіозв’язок може здійснюватися іоносферною (просторовою) та земною (поверхневою) хвилями (рис. 1.6). Зв’язок іоносферною хвилею є основним для цього діапазону, він може здійснюватися на дуже великі відстані (2000 км та більше) при відносно невеликій потужності передавачів. Значні відстані зв’язку досягаються за рахунок відбиття радіохвиль від іоносфери (в основному від шару F_2). Нижні шари іоносфери для КХ є поглинаючими.

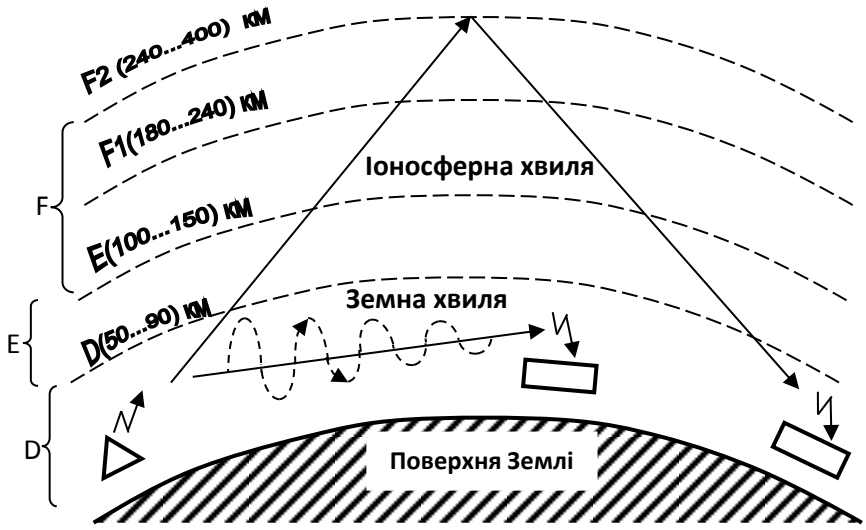


Рис. 1.6 – Розповсюдження коротких хвиль
(D, E, F – шари іоносфери)

Радіохвилі, що поширюються в безпосередній близькості від земної поверхні та частково її огинають внаслідок дифракції, називаються поверхневими або земними. Поверхневі хвилі при розповсюдженні зазнають *поглинання* Землею, будовами, лісовими масивами й таке інше, яке *тим більше, чим вище частота радіохвиль*. Земні хвилі в цьому діапазоні швидко загасають і дальність зв'язку, як правило, не перевищує 100…150 км.

З *ростом частоти поглинання енергії просторових хвиль в іоносфері зменшується*. Тому для зв'язку іоносферними хвилями доцільно використовувати більш високі частоти. Але радіозв'язок іоносферними хвилями можливий, якщо робоча частота лежить в області, що обмежена **максимальною застосовною частотою** (МЗЧ) і **найменшою застосовною частотою** (НЗЧ).

МЗЧ – це максимальна для даної траси значення частоти, на якій хвилі ще відбиваються від іоносфери і досягають пункту прийому, хвилі більш високих частот - проходять скрізь іоносферу без відбиття.

НЗЧ – найменша частота, на якій, при заданій потужності передавача, в пункті прийому напруженість поля хвилі достатня для надійного зв'язку.

Умови розповсюдження КХ у сильній ступені залежать від регулярних і нерегулярних змін іоносфери, що призводить до зміни МЗЧ і НЗЧ.

Просторові радіохвилі, що поширюються під нахилом до поверхні Землі, доходять до шарів іоносфери, у яких відбувається їхнє плавне переломлення – рефракція (рис. 1.7,б, промені 2,3,4).

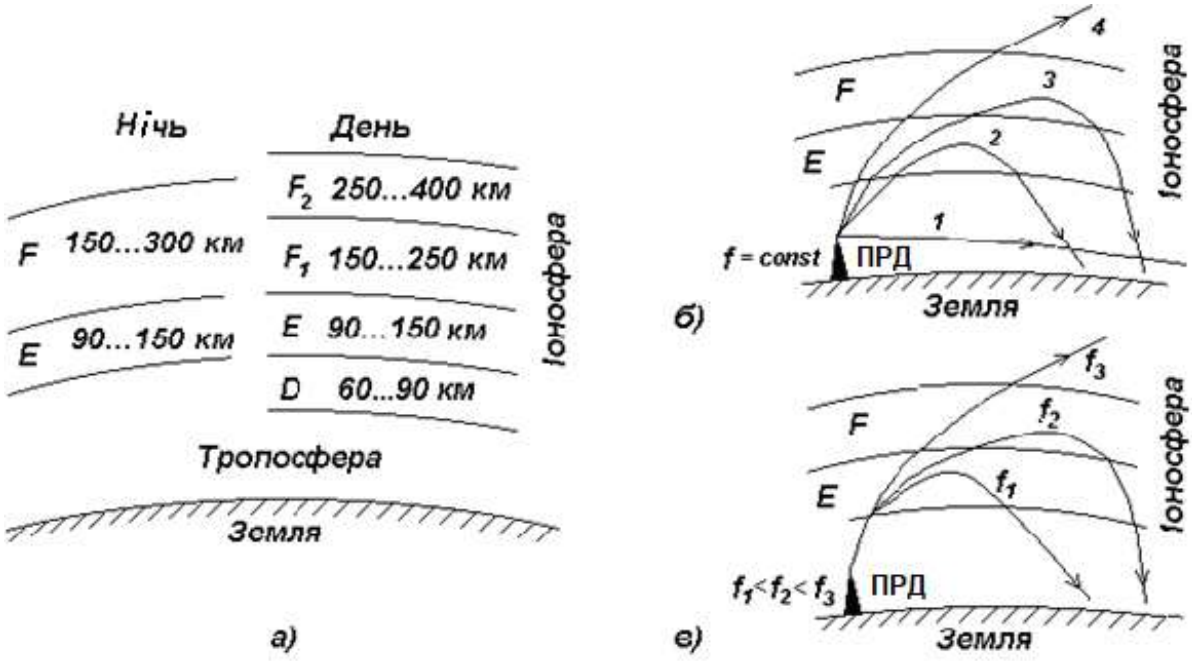


Рис. 1.7 – Висотні характеристики шарів іоносфери (*а*) та спотворення траєкторій променів радіохвиль іоносферою залежно від кута випромінювання (*б)* і частоти (*в)*

Можливість повернення радіохвиль до Землі залежить від їхньої частоти (f) та кута випромінювання. Чим менше кут випромінювання (рис. 1.7,б) і чим менше частота просторових хвиль (рис. 1.7,в), тем легше виконуються умови для їхнього повернення на Землю. Для кожного кута випромінювання при певному стані іоносфери існує *максимальна застосовна частота* (МЗЧ). Радіохвилі із частотами вище МЗЧ не повертаються до Землі (РХ на частоті f_3 на рис. 1.7.в).

Чим нижче частота (f), тим сильніше поглинання радіохвиль в атмосфері. Поглинання може бути настільки значним, що при вертикально посланій радіохвилі відбитий сигнал взагалі не вдається виявити. При підвищенні частоти поглинання зменшується, і рівень відбитого сигналу збільшується. Однак існує *критична частота* ($f_{кр}$), після якої вертикально послані радіохвилі від іоносфери не відбиваються, а йдуть у космічний простір (див. рис. 1.8). Удень $f_{кр}$= 5…15 МГц, уночі $f_{кр}$= 2…8 МГц. Зауважимо, що завжди $f_{кр} <$ МЗЧ.

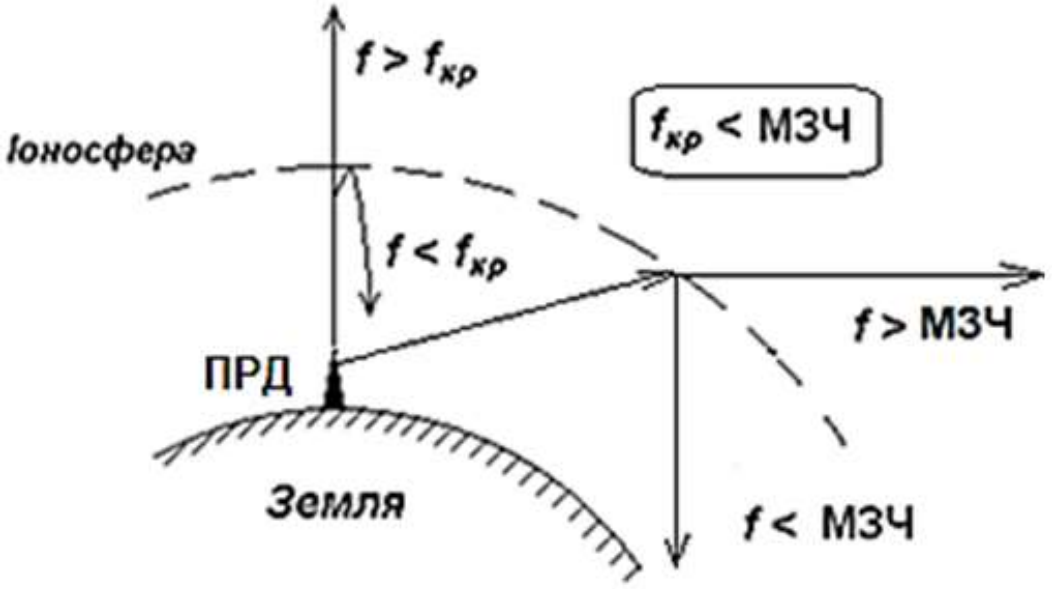


Рис. 1.8 – Критична та максимальна застосовна частота радіохвилі

Для визначення оптимальної частоти спочатку розраховують *критичну частоту*, яка для визначеного шару іоносфери дорівнює:

$$f_{кр[Гц]} = \sqrt{80{,}8 \times N},$$

де N – концентрація електронів у відповідному шарі іоносфери, 1/м^3.

Максимальна застосовна частота для відповідної радіолінії:

$$f_{\text{МЗЧ}} = \frac{f_{\text{кр}}}{\cos\theta},$$

де θ – кут падіння радіохвилі (рис. 1.2.4), який визначають для висоти відповідного шару іоносфери (h) та відстані від точки випромінювання (А) до точки падіння відбитого променю (В).

Оптимальна робоча частота ($f_{\text{ОРЧ}}$) вибирається в інтервалі між НЗЧ і МЗЧ, як правило, на 15% меншою за максимально застосовну.

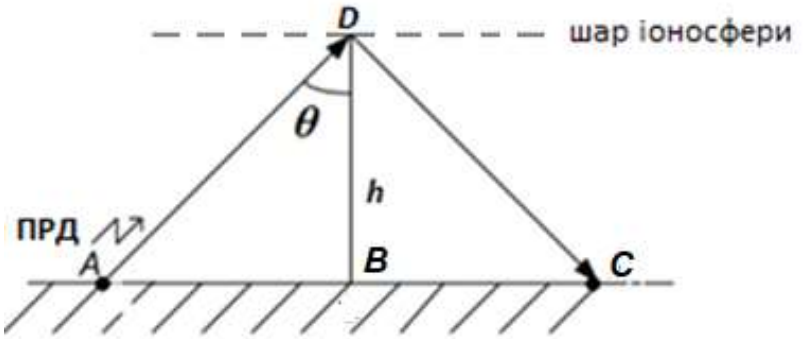


Рис.1.9 – Визначення кута падіння радіохвилі

При роботі радіосистем просторовою и земними хвилями може утворюватися *зона мовчання (*ділянка між точками *B* та *C),* коли зв'язок земними хвилями вже неможливий, а просторовими – ще неможливий (рис. 1.10).

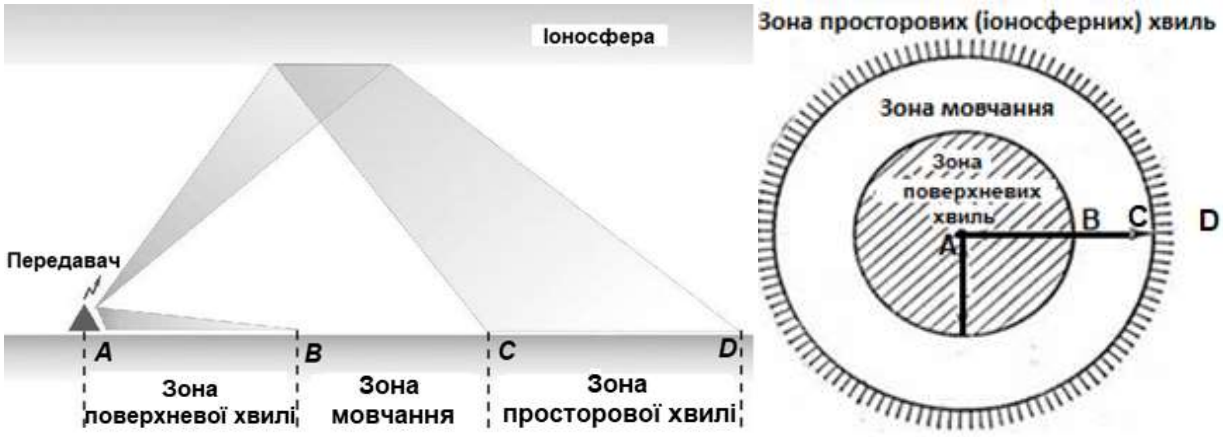


Рис. 1.10 – Утворення зони мовчання для радіохвиль діапазону КХ
(*AB* – зона радіопокриття поверхневими, а *CD* – просторовими хвилями)

Безперервна зміна ступені іонізації іоносфери приводить також до характерних для діапазону КХ *завмирань сигналу*, тобто зміни його амплітуди в точці прийому. Основною причиною завмирань є те, що в точку прийому радіохвиля приходить декількома шляхами. В наслідок цього

амплітуда і фаза результуючого коливання змінюються випадково. Період таких інтерференційних завмирань складає від частин до одиниць секунд і тому вони називаються *швидкими*.

Крім швидких завмирань в точці прийому спостерігаються *повільні* флуктуації потужності сигналу, які обумовлені зміною поглинання сигналу при розповсюдженні. Період таких флуктуацій може бути від десятків хвилин до години і більше.

Потрібність в частотах для радіозв'язку значно перевищують частотний ресурс КХ діапазону ($\Delta F_{кх}$=27 кГц). Тому однакові або близькі частоти можуть використовуватись в декількох радіосистемах світової мережі зв'язку, але це в наслідок далекого розповсюдження призводить до виникнення *взаємних завад*.

Висновки:

– завдяки іоносферному розповсюдженню радіохвилі діапазону КХ передаються на великі відстані;

– діапазон робочих частот залежить від стану іоносфери, яка в свою чергу залежить від пори року та часу доби;

– швидкі та повільні завмирання, взаємні станційні завади суттєво знижують надійність КХ радіозв'язку;

– діапазон КХ має обмежений частотний ресурс.

Особливості використання ультра коротких хвиль (УКХ) в радіозв'язку

Радіохвилі цих діапазонів (№ 8 та № 9) відбиваються від шарів іоносфери нерегулярно, тому зв'язок між наземними об'єктами можливий лише земними хвилями, які сильно поглинаються земною поверхнею. *З ростом частоти ступень поглинання збільшується*, але при цьому підвищується ефективність антен, за рахунок чого в значній мірі компенсується збільшення втрат радіосигналу.

Властивість *дифракції* проявляється слабо, а ***дальність зв'язку земною хвилею (радіогоризонт)*** незначно перевищує дальність прямої видимості між передавальною і приймальною антенами та з урахуванням *рефракції* визначається наступним виразом:

$$R_{[км]} = 4{,}12\left(\sqrt{h_{1[м]}} + \sqrt{h_{2[м]}}\right),$$

де h_1 і h_2 – висоти підвісу передавальної та приймальної антен відповідно.

Радіогоризонт визначає *максимальну теоретичну дальність* радіозв'язку в діапазоні УКХ, яка на практиці залежить від багатьох факторів:

– технічних характеристик радіообладнання;
– типу антен;
– діапазону робочих частот;
– електромагнітної обстановки в регіоні;
– рельєфу місцевості тощо.

Значний вплив на радіозв'язок оказують нерівності рельєфу місцевості та наявність споруд та інших перешкод, які викликають послаблення поля хвилі радіосигналу та є причиною виникнення ряду променів, що інтерферують (накладаються) в точці прийому. Це явище називається *багатопроменевим розповсюдженням*. При зв'язку між об'єктами, які рухаються, це призводить до додаткових завмирань сигналу.

Широке використання УКХ для радіозв'язку обумовлено наступними властивостями цього діапазону:

– *велика частотна ємність* ($\Delta F_{мх}$=270 МГц та $\Delta F_{дмх}$=2700 МГц), яка забезпечує одночасну роботу значної кількості радіозасобів;

– невелика дальність взаємних завад внаслідок розповсюдження земними хвилями, що дає можливість *повторного використання робочих частот* в різних радіосистемах, які знаходяться на відповідних відстанях одна від одної;

– можливість використання *не великих за розміром* і разом з тим високоефективних *мобільних антен*;

– *слабка залежність* радіозв'язку від стану іоносфери, часу і доби, та метеорологічних умов;

– *постійність параметрів радіоканалу*.

<u>Контрольні запитання і завдання</u>

1. Які частоти відносять до радіочастотного спектру та яким чином вони поділяються на діапазони?
2. Які діапазони частот застосовують в сухопутному іоносферному радіозв'язку?
3. В чому полягають особливості розповсюдження радіохвиль діапазону високих частот (коротких хвиль)?
4. Що таке критична, максимально застосовна та оптимальна частоти, як вони розраховуються та від чого залежать?
5. Розрахувати критичну частоту для КХ радіозв'язку, якщо концентрація електронів на відповідній території складає 150 000 1/см^3.
6. Розрахувати оптимальну частоту для КХ радіозв'язку, якщо концентрація електронів у шарі F_2 на відповідній території складає

500 000 1/см^3, довжина радіолінії – 3300 км, а середня висота шару F_2 дорівнює 270 км.

7. Яким чином затухання радіосигналу залежить від частоти для поверхневих та іоносферних хвиль?
8. В чому полягають особливості розповсюдження радіохвиль діапазону УКХ?
9. Що таке радіогоризонт і від чого він залежить?
10. Розрахувати радіогоризонт для радіосистеми в УКХ діапазоні, якщо висота підвісу передавальної антени складає 120 метрів, а приймальної – 10 метрів.

1.3. Управління використанням радіочастотного ресурсу

Міжнародні організації стандартів в галузі зв'язку.

Організації стандартизації в галузі телекомунікацій – це організації, мета діяльності яких полягає в створенні єдиних міжнародних стандартів.

Відсутність єдиних стандартів призводить до несумісності обладнання різних виробників і, як наслідок, до неможливості організації міжнародного зв'язку. Організації стандартизації забезпечують умови для обговорення прогресивних технологій, затверджують результати цих обговорень у вигляді офіційних стандартів, а також забезпечують поширення затверджених стандартів.

Порядок роботи організацій стандартизації щодо прийняття стандартів може відрізнятися. Як правило, алгоритм розробки є наступним: відбувається декілька етапів розробки та обговорення нових технологій, розробка проектів стандартів, голосування по всім або деяким аспектам цих стандартів і, нарешті, офіційний випуск завершених стандартів.

Найбільш відомими організаціями стандартизації є такі:

- Міжнародна організація стандартизації (***ISO***–*International Standard Organization*) – є автором стандартів в різних областях діяльності, включаючи стандарти з телекомунікацій. Членами *ISO* є національні організації стандартизації. Участь в *ISO* є добровільною. Найбільш відомим стандартом *ISO* в галузі телекомунікацій є, наприклад, еталонна модель взаємодії відкритих систем.

– Телекомунікаційний сектор стандартизації Міжнародного союзу електрозв'язку МСЕ-Т (***ITU-T*** – *Telecommunication Standardization Sector of International Telecommunication Union*) – спеціалізований орган ООН, який з 1993 року є правонаступником Міжнародного Консультативного комітету по телеграфії та телефонії (МККТТ) (*CCITT– Comite Consultatif International Telegraphique et Telephonique*), який займається розробкою

телекомунікаційних стандартів. Крім МСЕ-Т до складу МСЕ входять *Сектор радіозв'язку* МСЕ-Р (*ITU-R – Radiocommunication Sector)* і *Сектор розвитку електрозв'язку* (*ITU-D – Telecommunication Development Sector*). Стандарти *ITU-T* охоплюють практично всю галузь телекомунікацій.

– Інститут Інженерів по Електротехніці та електроніці (***IEEE*** *–Institute of Electrical and Electronic Engineers*) – професійна організація, яка розробляє стандарти для різних мереж. Стандарти локальних мереж *LAN*, в тому числі і безпроводових, є найбільш відомими стандартами *IEEE* з телекомунікацій.

– Європейський інститут стандартизації електрозв'язку (***ETSI*** – *European Telecommunications Standards Institute*) – визначає єдину технічну політику в галузі телекомунікацій для країн-членів Європейського співтовариства. Одним з найбільш відомих стандартів *ETSI* є стандарт систем стільникового рухомого зв'язку *GSM*.

– Європейська конференція адміністрацій пошт та електрозв'язку (*CEPT – Conference of European Posts and Telegraphs*).

– Європейська асоціація виробників (*ECMA – European Computer Manufactures Association*).

– Американський Національний Інститут Стандартизації (*ANSI*– *American National Standard Institute*) – є координуючим органом добровільних груп по стандартизації в межах США та членом *ISO*.

– Асоціація Телекомунікаційної Промисловості (*TIA* – *Telecommunication Industrial Association*) – одна з груп *ANSI*, що випускає стандарти з телекомунікацій. Найвідомішими стандартами *TIA* є стандарти систем стільникового зв'язку *CDMA IS*-54, *IS*-95.

– Асоціація Електронної Промисловості (*EIA–Electronic Industrial Association*) – так само, одна з груп ANSI.

– Федеральна комісія зв'язку США (*FCC – Federal Communication Commission*) – урядова організація США, що займається регулюванням в галузі зв'язку, в тому числі розподілом спектра радіочастот.

Виробники телекомунікаційного обладнання, які зацікавлені в швидкому просуванні деякої конкретної технології, також створюють різні організації та форуми.

Нормативно - правове підґрунтя використання РЧР України

Високі темпи розвитку та глобалізація радіозв'язку рано, чи пізно призведуть до суттєвої нестачі наявного РЧР, тому ефективне та раціональне його використання можливе лише при проведенні всіма країнами світу погодженої технічної політики і вимагає добре налагодженої системи регулювання в сфері використання РЧР у межах кожної держави.

Регулювання у сфері використання РЧР – це сукупність узгоджених юридичних, адміністративних, наукових і технічних процедур, необхідних для забезпечення ефективної роботи обладнання та служб радіозв'язку без створення недопустимих радіозавад.

Юридичні аспекти регулювання у сфері використання РЧР полягають у формуванні законодавчих (нормативних) засад, що регламентують використання РЧР і діяльність органів управління та регулювання.

Адміністративні – у створенні процедур, що регулюють взаємовідносини користувачів РЧР і органів управління та регулювання в процесі використання РЕЗ.

Наукові – у розробці методології виділення смуг (номіналів) радіочастот, стандартів на параметри електромагнітної сумісності (ЕМС) РЕЗ та РВП.

Технічні – у здійсненні єдиної технічної політики: створення єдиних методик та програм для аналізу ЕМС РЕЗ та РВП, стандартизації параметрів РЕЗ і РВП, сертифікації засобів зв'язку та обладнання радіочастотного контролю.

Мета регулювання - максимально підвищити ефективність використання РЧР і звести рівень радіозавад до мінімально можливого.

Регулювання у сфері використання РЧР базується на законодавчо-нормативних актах і міжнародних угодах, які забезпечують розвиток засобів зв'язку у відповідності з державними пріоритетами і гарантують, що робота обладнання різних служб радіозв'язку не буде супроводжуватися недопустимими радіозавадами між обладнанням як у межах однієї радіослужби, так і між різними радіослужбами.

Регулювання у сфері використання РЧР включає:

- визначення довгострокової політики та планування використання РЧР шляхом вдосконалення існуючих та розвитку й впровадження нових засобів зв'язку;
- частотно-територіальне планування, координацію та присвоєння радіочастот засобам і мережам зв'язку, що вводяться в експлуатацію;
- ліцензування та сертифікацію РЕЗ;
- облік використання РЧС;
- розробку технічних стандартів і нормативних документів;
- підтримку технічних засобів радіоконтролю;
- інспекцію засобів зв'язку на місцях їх експлуатації;

– контроль за використанням спектра тощо.

Одним із суттєвих важелів, що впливають на ефективність використання РЧР і забезпечують надходження коштів для вдосконалення системи регулювання у сфері використання РЧР та системи радіочастотного контролю, є *економічні заходи,* мета яких - *стимулювати споживачів РЧР до більш раціонального використання спектра та хоча б частково компенсувати затрати на регулювання у сфері використання РЧР.*

Основні економічні заходи включають:

– плату користувачів РЧР за забезпечення каналів, вільних від радіозавад, та гарантію якісного зв'язку;

– плату за підбір та присвоєння радіочастоти й надання ліцензії (дозволу) на її використання;

– плату за сертифікацію засобів зв'язку по ЕМС;

– штрафні санкції за порушення правил ведення радіозв'язку та недотримання параметрів РЕЗ.

Системи регулювання у сфері використання РЧР різних країн мають певні відмінності, зумовлені особливостями внутрішньодержавного характеру.

Розглянемо основні закони на нормативно-правові акті, на основі яких відбувається державне регулювання використання радіочастотного ресурсу України:

1. Закон України “Про радіочастотний ресурс України”.
2. Національна таблиця розподілу смуг радіочастот України.
3. План використання радіочастотного ресурсу України.

Закон України “Про радіочастотний ресурс України” встановлює правову основу користування радіочастотним ресурсом України, визначає повноваження держави щодо умов користування радіочастотним ресурсом України, права, обов'язки і відповідальність органів державної влади, що здійснюють управління і регулювання в цій сфері, та фізичних і юридичних осіб, які користуються та/або мають намір користуватися радіочастотним ресурсом України.

Метою цього Закону є створення правових засад для ефективного та раціонального використання радіочастотного ресурсу України для забезпечення економічного, соціального, інформаційного та культурного розвитку, державної безпеки, обороноздатності, виконання міжнародних зобов'язань.

Національна таблиця розподілу смуг радіочастот України регламентує розподіл смуг радіочастот радіослужбам в Україні та визначає смуги радіочастот спеціального та загального користування.

Таблиця складається з трьох граф. У графі *першій* наведено дані про розподіл смуг радіочастот між радіослужбами і номери приміток згідно з Регламентом радіозв'язку Міжнародного союзу електрозв'язку (далі – Регламент радіозв'язку) для ***Району 1***, до якого належить Україна. У графі *другій* наведено дані про розподіл смуг радіочастот радіослужбам в Україні і номери приміток до нього, що починаються з літери "У", зміст яких викладено у кінці Таблиці. У примітках до розподілу смуг радіочастот конкретизовано (уточнено) умови використання смуг, номіналів радіочастот. У графі *третій* Таблиці наведено призначення смуг радіочастот в Україні, а саме:

– загального користування (ЗК), що призначені переважно для радіоелектронних засобів (далі – РЕЗ) загальних користувачів;

– спеціального користування (СК), що призначені виключно для РЕЗ спеціальних користувачів.

План використання радіочастотного ресурсу України – нормативно-правовий акт, яким визначаються напрями використання радіочастотного ресурсу України на даний час та на перспективу з визначенням певних смуг, номіналів радіочастот і дозволених в Україні радіотехнологій та термінів застосування діючих і перспективних радіотехнологій.

План використання радіочастотного ресурсу України визначає:

– перелік радіотехнологій, що використовуються в Україні, з визначенням смуг радіочастот та радіослужб, яким вони відповідають, а також терміни припинення їх розвитку та використання (Розділ I Плану);

– перелік перспективних для впровадження в Україні радіотехнологій із визначенням смуг радіочастот та радіослужб, яким вони відповідають, а також терміни їх впровадження (Розділ II Плану).

Структура та завдання органів державного управління та регулювання РЧР.

Державне управління у сфері користування радіочастотним ресурсом України здійснюють:

– Кабінет Міністрів України;

– центральний орган виконавчої влади у галузі зв'язку (ЦОВЗ).

Органами регулювання у сфері користування радіочастотним ресурсом України є:

– Національна комісія з питань регулювання зв'язку (НКРЗ);
– Український державний центр радіочастот (УДЦР);
– Генерального штабу Збройних Сил України;
– Національна рада України з питань телебачення та радіомовлення.

Основними засадами регулювання у сфері користування радіочастотним ресурсом України є:

– забезпечення ефективного користування радіочастотним ресурсом України в інтересах усіх категорій користувачів;
– забезпечення рівних умов отримання радіочастотного ресурсу України на прозорих і недискримінаційних засадах;
– забезпечення і захист інтересів держави;
– нормативно-правове регулювання у сфері користування радіочастотним ресурсом України;
– прозорість, підзвітність регулювання у сфері користування радіочастотним ресурсом України;
– заохочення конкуренції в інтересах суспільства за умови ефективного користування радіочастотним ресурсом України;
– забезпечення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів.

1.4. Види радіосигналів в системах радіозв’язку

В системах радіозв’язку передаються як ***безперервні*** так і ***дискретні*** повідомлення. Так, до перших відносяться телефонні повідомлення, до других – телеграфні повідомлення, сигнали систем передачі даних тощо.

Повідомлення, які перетворені в первинний сигнал, для передачі по радіоканалу підлягають процесу модуляції. При цьому один і той же первинний сигнал може бути перетворений в різні види радіосигналів. Наприклад, речовий (телефонний) сигнал може бути перетворений в амплітудно-модульований або в частотно-модульований радіосигнали. Передача радіосигналів по радіоканалу супроводжується витратам енергетичного і частотного ресурсу радіолінії, який буде різним при різних видах радіосигналів. Розглянемо з цих позицій основні радіосигнали.

Безперервні радіосигнали

Радіосигнали з **амплітудною модуляцією несівної** (АМ)

(вид випромінювання – ***A3E; DSB*** *– Double SideBand)*

Амплітудно-модульований сигнал являє собою радіочастотне коливання, амплітуда якого змінюється по закону зміни електричного

сигналу повідомлення. Сигнали використовується для передачі телефонних повідомлень в діапазонах радіочастот нижче 30 МГц. Спектр (рис. 1.11) сигналу *А*3*Е* має несівну частоту та дві бічні смуги – верхню та нижню. Смуга частот, яка необхідна для АМ-сигналу в радіоканалі визначають наступним виразом:

$$\Delta \boldsymbol{F_c} = (f_{\text{н}} + F_{max}) - (f_{\text{н}} - F_{max}) = \boldsymbol{2F_{max}}.$$

В системах радіозв'язку обирають F_{min}=0,3 кГц, а F_{max}=3,4 кГц, тому необхідна смуга частот дорівнює ΔF_c=6,8 кГц.

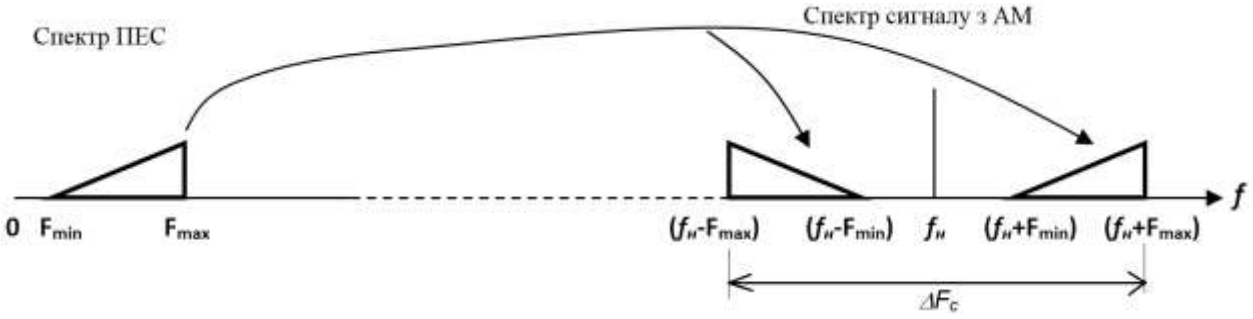


Рис. 1.11 – Спектр первинного та АМ сигналів

Середня потужність сигналу АМ на виході радіопередавача з амплітудною модуляцією визначається формулою:

$$P_{сер} = P_{н}\left(1+\frac{m^2_{\max}}{П^2}\right) = P_{н} + P_{бічн}; \Rightarrow P_{бічн} = P_{н}\frac{m^2_{\max}}{П^2},$$

де $P_{\text{н}}$ – потужність випромінювання на несівній частоті;

$P_{\text{бічн}}$ – потужність випромінювана на частотах бічних смуг;

$m_{\text{макс}}$ – коефіцієнт модуляції;

П – пікфактор первинного модулюючого сигналу.

Так, при m=1 та П=3,3 потужність бічних смуг сигналу АМ, де міститься корисна інформація, складає менше 10% від потужності несівної.

Висновки:

– оскільки в бічних смугах міститься однакова інформація, то радіочастотний спектр використовується неекономно;

– енергетичний ресурс передавача також витрачається недоцільно на випромінювання несівної та іншої бічної смуги;

– сигнал А3Е використовують тільки в діапазонах частот менше 30 МГц.

В радіосигналі з АМ 70% потужності передавача витрачається на випромінювання сигналу несівної частоти, який не містить ніякої інформації про первинний модулюючий сигнал. Решта 30% діляться порівну між двома бічними частотними смугами, які представляють собою точне дзеркальне відображення одне одного. Таким чином, ***основним недоліком АМ сигналів є їх енергетична і частотна надмірність***. Тобто, без жодного збитку для переданої інформації можна виключити із спектра сигналу несівну та одну з бічних смуг, і витрачати всю потужність передавача для випромінювання лише інформативного сигналу. Усунення даного недоліку дозволить більш ефективно використовувати енергію сигналу і, як наслідок підвищити завадозахищеність прийому.

Односмугова модуляція (ОМ)

(види випромінювань – ***H3E, R3E, J3E; SSB*** *– single sideband)*

Сигнал з односмуговою модуляцією (ОМ) формується шляхом придушення в спектрі АМ сигналу однієї з бічних смуг і несівної. Сигнал використовується для передачі телефонних повідомлень в діапазонах радіочастот нижче 30 МГц. Спектральні та енергетичні характеристики сигналів ОМ приведені на рис.1.12.

Повідомлення можуть передаватися як по *верхній* (A_1) – ***USB***, так і по *ніжній бічній смузі* (B_1) – ***LSB*** з *повною, ослабленою і повністю придушеною несівною*. Необхідна смуга частот сигналів з ОМ визначають по формулі:

$$\Delta \boldsymbol{F_c} = (f_н + F_{max}) - f_н = \boldsymbol{F_{max}} \text{ або } \Delta \boldsymbol{F_c} = f_н - (f_н - F_{max}) = \boldsymbol{F_{max}}.$$

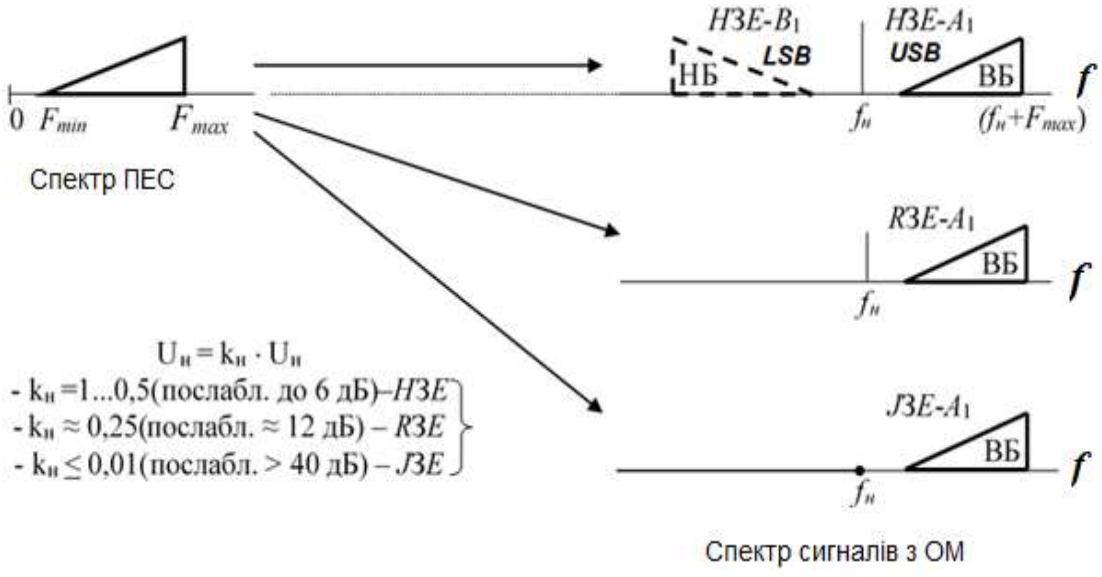


Рис. 1.12 – Спектри односмугових сигналів

Такий вид модуляції дозволяє використовувати практично до 100% потужності радіосигналу для передачі безперервного повідомлення при скороченні займаної смуги частот у порівнянні з АМ сигналами вдвічі. Сигнали *R*З*E* і *J*З*E* є основними сигналами, які використовуються для телефонного радіозв'язку у КХ-діапазоні.

Висновки:

– сигнали з ОМ в порівнянні з АМ займають вдвічі мешу смугу частот та, практично, всю потужності радіосигналу витрачають на передачу корисної інформації;

– сигнали з ОМ в порівнянні з АМ сигналами мають більш високу завадостійкість, що досягається усуненням енергетичної та частотної надмірності АМ сигналу.

Радіосигнали з **частотною модуляцією** (ЧМ)
(вид випромінювання *F*З*E*, *FM)*

Різновидами *кутової модуляції* є фазова (ФМ) і частотна модуляції (ЧМ). При кутовій модуляції відповідно до переданого повідомлення змінюється частота (фазовий кут) несівного коливання. Амплітуда і середня потужність сигналу при цьому залишаються незмінними. *Частотна модуляція* використовується для передачі телефонних повідомлень в діапазонах радіочастот вище 30 МГц.

Як відомо, спектр ЧМ коливання є нескінченим (рис. 1.13), але його основна енергія зосереджена в обмеженій смузі частот, яка визначається формулою:

$$\Delta F_c = 2F_{max}(1 + m_{\text{чм}} + \sqrt{m_{\text{чм}}}),$$

де F_{max} – максимальна частота первинного сигналу; $m_{\text{чм}}$ – індекс частотної модуляції.

В системах професійного радіозв'язку зазвичай використовують F_{max}=3,4 кГц, $m_{\text{чм}}$=1,4...1,5. При цьому смуга частот ЧМ-сигналу складає 17 кГц (практично застосовують рознесення частот 12,5 кГц або 25 кГц).

Висновки:

– спектр сигналів з ЧМ значно більший сигналів з АМ та ОМ, тому їх використання доцільно лише в діапазонах частот із великою частотною ємністю – діапазони УКХ (30–3000 МГц);

– незмінність амплітуди ЧМ сигналу дозволяє забезпечити більш ефективне використання потужності радіопередавача (середня потужність сигналу може досягати максимальної потужності передавача, що особливо важливо для радіостанцій малої потужності);

– ЧМ сигнали мають найкращу завадозахищеність серед аналогових радіосигналів.

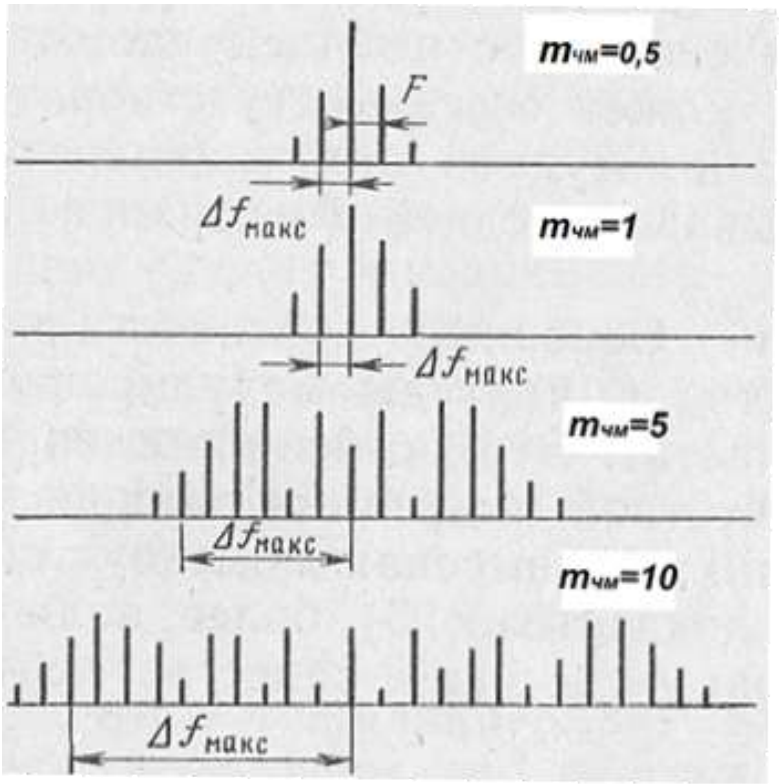


Рис. 1.13 – Спектри ЧМ сигналів з різними індексами модуляції

($\Delta f_{макс}$ – максимальна девіація частоти)

Порівняльний аналіз видів аналогової модуляції

Під час розробки будь-якої системи радіозв'язку доводиться враховувати не тільки завадостійкість прийому, але і значна кількість інших вимог і обмежень. Це і коефіцієнт використання потужності передавача, ширина спектра радіосигналу і завантаженість обраного діапазону частот, необхідна стабільність частоти задаючих генераторів і стійкість до завмирань, простота технічної реалізації тощо.

Порівняльний аналіз різних видів модуляції можна звести до наступного:

1. Амплітудна модуляція (АМ) застосовується в діапазонах радіочастот менше 30 МГц. Переваги – простота реалізації, невисокі вимоги до стабільності частоти задаючих генераторів. Недоліки – низька завадостійкість, частотна і енергетична надлишковість.

2. Односмугова модуляція (ОМ) застосовується в діапазонах радіочастот менше 30 МГц. Переваги – в умовах адитивних завад забезпечується практично десятикратний "узагальнений виграш" по завадостійкості в порівнянні з АМ, системи зв'язку з ОМ в порівнянні з АМ більш стійкі до завмирань. Недолік – необхідність використання на прийомі синхронних детекторів.
3. Частотна модуляція (ЧМ) застосовується в діапазонах УКХ (МВ, ДМВ). Переваги – висока завадостійкість, низькі вимоги до стабільності частоти, простота технічної реалізації. Недолік – прояв «порогового ефекту» – різкого нелінійного зменшення сигналу на виході при зменшенні вхідного співвідношення сигнал/шум.

Дискретні радіосигнали

Радіосигнали з **амплітудною маніпуляцією**
(види випромінювань – ***A1A, A2A***;
ASK *– Amplitude Shift Keying,* ***CW*** *– Continuous Wave*)

Сигнали з АМн використовуються для передачі телеграфних повідомлень за допомогою коду “Морзе”.

Сигнал ***A1A*** формується шляхом маніпуляції коливань несівної частоти первинним сигналом. Спектр сигналу є нескінченим і містить складову на несівній частоті та бічних складових непарних порядків (n = 1, 3, 5 ...), які кратні *частоті маніпуляції* первинного сигналу $F_м$ (рис.1.14).

Основна енергія сигналу зосереджена в межах складових п’ятого порядку. Тому ширину смуги частот, яку займає сигнал, визначають за формулою:

$$\Delta F_c = 2nF_м,$$

де n = 3 або 5.

Використовують ще такий параметр як *швидкість телеграфування* $B_{[Бод]}=2F_м$, де $F_м=1/T$.

Приймання сигналу *A*1*A* зазвичай здійснюється на слух, тому швидкість телеграфування не велика і складає всього 20...25 Бод, тобто частота маніпуляції буде $F_м=B/2$=(10...12,5) Гц, а $\Delta F_с$=100...125 Гц. В наслідок своєї вузькосмуговості сигнал *A*1*A* використовується в КХ-діапазоні.

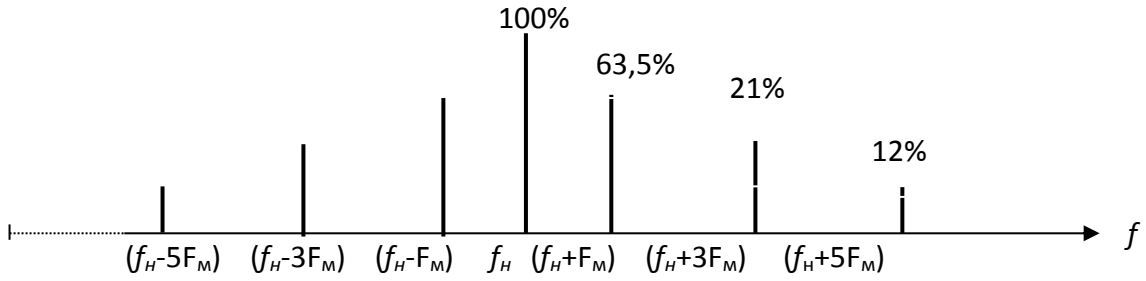


Рис.1.14 – Спектр сигналу з АМн (випромінювання А1А)

Сигнал ***A2A*** утворюється шляхом модуляції несівного коливання звуковим коливанням $F_{зв}$=(800...1000) Гц відповідно з літерами коду "Морзе". При цьому спектр сигналу подібний спектру *A*3*E* при модуляції одним тоном (рис. 1.15) і займає достатньо значну смугу частот $\Delta F=2F_{зв}$=1,6…2,0 кГц, тому сигнал *A*2*A* використовується не дуже часто.

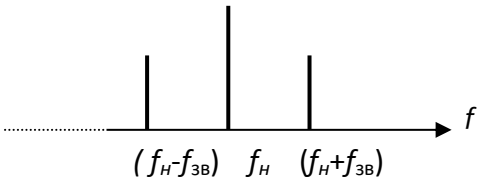


Рис. 1.15 – Спектр сигналу випромінювання *A*2*A*

Радіосигнали з **частотною маніпуляцією (*FSK*)**
(види випромінювань – ***F1B, F7B)***

ЧМн сигнали використовуються для передачі телеграфних (фототелеграфних) повідомлень та інших даних в системах радіозв'язку.

Сигнал ***F1B*** – одноканальний радіосигнал, який утворюється шляхом дискретної зміни частоти несівного коливання. Несівна частота приймає два значення "f_0 " і "f_1", які відповідають **"0"** або **"1"** первинного дискретного сигналу (рис.1.16).

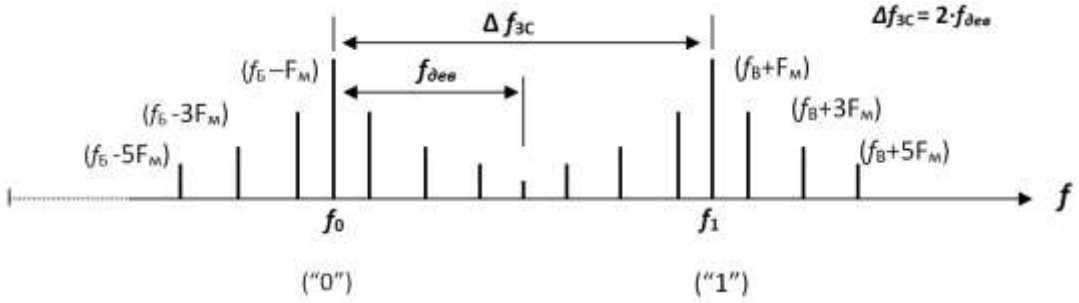


Рис.1.16 – Спектр ЧМн-сигналу (*F*1*B)*

Спектр сигналу на частоті f_0 (натискання) або частоті f_1 (відпускання) подібний спектру сигналу *A*1*A*. Смуга частот, яку займає сигнал, залежить від *частотного зсуву* $\Delta f_{зс}$ і визначається формулою:

$$\Delta F_c = \Delta f_{зс} + 2nF_м,$$

де n = 3 або 5.

Сигнал ***F7B*** – двоканальний радіосигнал, який передається з використанням чотирьох частот, кожна з котрих відповідає однієї комбінації посилок в телеграфному каналі (00, 01, 10, 11). Смуга частот, яку займає сигнал, визначається наступним виразом:

$$\Delta F_c = 3\Delta f_{зс} + 2nF_м,$$

де n = 3 або 5

Радіосигнали з **відносно фазовою маніпуляцією (*PSK*)**
(клас випромінювань - ***G1B*);**

Фазова маніпуляція (ФМн, англ. *Phase shift keying (PSK)*) — *один з видів фазової модуляції, при якій фаза частоти носія змінюється стрибкоподібно залежно від інформаційного повідомлення.*

Спектр сигналу подібний спектру сигналу *A*1*A*, але він не містить складової несівного коливання (рис.1.17)

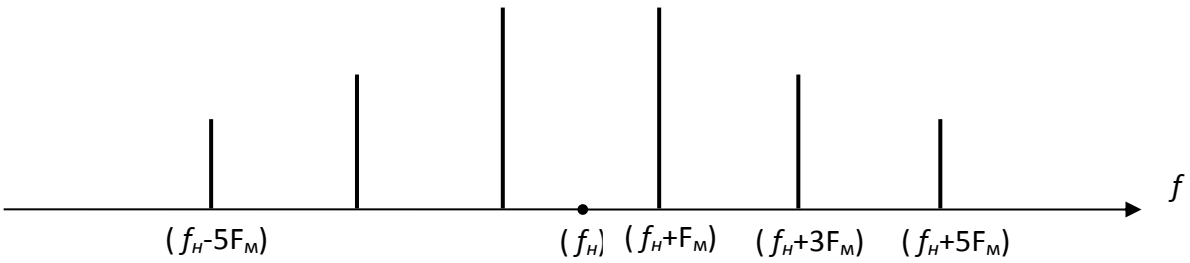


Рис. 1.17 – Спектр сигналу з ВФМн *(G1B)*

Смуга частот, яку займає сигнал, визначається наступним виразом:

$$\Delta F_c = 2nF_м,$$

де n = 3 або 5.

Дискретні сигнали, що були розглянуті, відносяться до *вузькосмугових радіосигналів*. В цифрових системах зв'язку крім того використовують багатопозиційні маніпульовані сигнали (наприклад, π/4 *DQPSK*, 8*PSK*, *QAM*-16, …).

Характеристики (критерії) якості радіозв'язку

Будь-яка система зв'язку характеризується рядом показників, які можна розділити на інформаційно-технічні (достовірність, стійкість, швидкість передачі інформації, діапазон частот, дальність зв'язку тощо) і конструктивно-експлуатаційні (маса-габаритні характеристики апаратури, мобільність, експлуатаційна надійність, вартість тощо).

В загальному понятті під **якістю радіозв'язку** розуміється сукупність характеристик, до яких пред'являються визначені вимоги.

Радіозв'язок, як процес передачі інформації, повинен відповідати вимогам, які визначають якість радіозв'язку, по:

- вірогідності (достовірність);
- своєчасності;
- скритності (прихованості) передачі повідомлень (використовують для спеціального зв'язку).

Вірогідність передачі повідомлення взагалі оцінюється мірою вірності його відтворювання на виході кінцевого приймального пристрою. Але при оцінці якості власно радіоканалу цей критерій буде неточний, тому що спотворення повідомлення можуть бути внесені крім радіоканалу і перетворювачем повідомлення в первинний сигнал модулятором, а також при демодуляції і зворотному перетворенні сигналу. Тому під *вірогідністю* (достовірністю) *радіозв'язку* можна розглядати точність відтворювання первинних електричних сигналів на виході радіоканалу (радіолінії).

Достовірність передачі інформації характеризує ступінь відповідності прийнятих повідомлень переданим. Вона залежить від параметрів самої системи, ступеня її технічної досконалості і умов роботи, а також організаційних заходів щодо дотримання правил радіообміну і експлуатації апаратури.

Підвищення вірогідності радіозв'язку досягається за рахунок використання:

- завадостійкого кодування;
- видів модуляції з підвищеною завадостійкістю;
- зворотного каналу;
- спеціальних способів обробки сигналів тощо.

Для різних видів сигналів існують різні критерії вірогідності.

При оцінці вірогідності (достовірності) передачі безперервних телефонних (мовних) повідомлень використовується *критерій вірності*

відтворювання повідомлення. При цьому кількісною оцінкою вірогідності є ***артикуляційні втрати***:

$$\boldsymbol{A = \frac{R_{\text{сп}}}{R}},$$

де $R_{\text{сп}}$ – кількість невірно прийнятих елементів мови (спотворених); R – кількість переданих елементів.

Елементами мови можуть бути *звуки, слова, фрази*. Частіше використовується критерій допустимих втрат фразової артикуляції ($A_{\text{допуст}}$). Прийнято вважати, що телефонний зв'язок є «відмінним», якщо фразові артикуляційні втрати менше 1%, «добрим» – при А=1…3% і «задовільним» – при А=3...5%.

При передачі повідомлень дискретними сигналами вірогідність (достовірність) кількісно оцінюється ***імовірністю помилкового прийому*** *елемента сигналу* (символу, посилки):

$$\boldsymbol{P_{\text{пом}} = \frac{N_{\text{сп}}}{N}},$$

де $N_{\text{сп}}$ – кількість спотворених елементів сигналу; N – кількість елементів, які були передані.

Вимоги, які пред'являються до вірогідності прийому дискретних сигналів, визначаються можливістю логічного відтворення спотворених елементів, а також важливістю інформації, що передається ($P_{\text{пом}} \leq P_{\text{пом.доп}}$). Так допустима імовірність помилок в прийомі елементів телеграфних сигналів, які передаються по звичайним лініям радіозв'язку, складає $(3…5)*10^{-3}$, тобто 3…5 спотворених елементів сигналу на 1000, що передані, а в каналах передачі телекодових сигналів автоматизованих систем управління – $P_{\text{пом.доп.}}=(1…10)*10^{-6}$ (рис.1.18).

При передачі цифрової інформації на практиці ще використовують такий параметр, як *інтенсивність бітових помилок* (***BER*** – *Bit Error Rate)*, що розраховується аналогічним чином.

Своєчасність передачі повідомлень – це час знаходження (перебування) повідомлення в системі зв'язку від моменту відправлення його на передачу до моменту вручення адресату. Реальний час перебування повідомлень в системі зв'язку складається з ряду операцій, таких як: доставка

повідомлень, їх обробка (кодування, декодування), час чекання передачі і власно час передачі по радіоканалу.

Прихованість (скритність) спеціального радіозв'язку характеризує його здібність приховати (скрити) самий факт передачі інформації. Радіосистема вважається розкритою, якщо супротивнику відомі її склад, робочі частоти, позивні кореспондентів і їх приналежність конкретним пунктам управління. Кількісною мірою прихованості (скритності) радіозв'язку є час, який необхідний супротивнику для його розкриття.

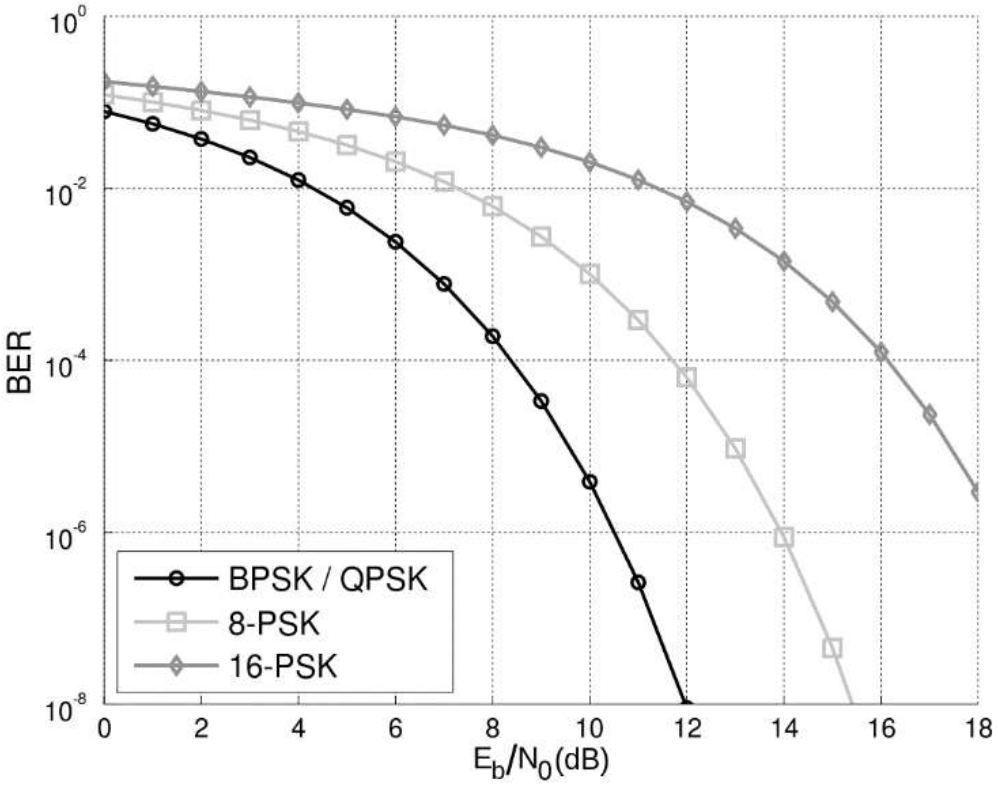


Рис. 1.18 – Залежність інтенсивності бітових помилок (*BER*) від співвідношення сигнал/шум (*SNR*) для різних радіосигналів

Крім того, важливою характеристикою радіозв'язку є *дальність зв'язку*, яка залежить від:

– характеристик радіообладнання (потужності передавача, чутливості приймача, характеристик антен, висоти підвісу антен (для діапазону УКХ) тощо);

– діапазону радіочастот, що застосовується;

– методу обробки сигналу;

– рельєфу місцевості та характеру його забудови;

– електромагнітної обстановки, в тому числі – завантаження діапазону частот та наявності радіозавад, промислових завад тощо.

Контрольні запитання і завдання

1. Які радіосигнали (види випромінювань) використовують в радіозв'язку для передачі безперервних (аналогових) та дискретних (цифрових) сигналів?
2. Яким чином розраховують необхідну смугу частот для різних радіосигналів та від чого вона залежить?
3. Розрахувати та порівняти значення необхідної смуги частот для радіосигналів з амплітудною (вид випромінювання *A3E*) та односмуговою (вид випромінювання *R3E*) модуляціями при передачі мовного повідомлення, яке обмежено смугою частот 0,3…3,4 кГц?
4. Розрахувати необхідну смугу частот на рівні третьої гармоніки для радіосигналу з частотною маніпуляцією (вид випромінювання *F*1*B*) з девіацією частоти 250 Гц для передачі телеграфного повідомлення зі швидкістю телеграфування 100 Бод.
5. Розрахувати необхідну смугу частот для радіосигналу з частотною модуляцією для передачі мовного повідомлення, яке обмежено смугою частот 0,3…3,4 кГц, а індекс частотної модуляції $m_{чм}$=1,3.
6. Які критерії використовують для оцінки якості радіозв'язку?

1.5. Електромагнітна сумісність радіоелектронних засобів

Причини виникнення електромагнітних завад

Широке впровадження радіоелектронних засобів (РЕЗ) в різні сфери людської діяльності, зростання кількості високочастотного обладнання для промислових, наукових та медичних цілей призводить до насичення радіочастотного спектру (РЧС), зростання рівня електромагнітних полів, створюваних ними в навколишньому просторі.

Нині використання РЧС ведеться в умовах інтенсивного росту завантажень діапазонів частот, який можна пояснити наступними основними причинами:

– введення нових систем рухомого радіозв'язку та радіосистем для моніторингу, управління та діагностики об'єктів;

– використання широкосмугових сигналів;

– збільшення кількості стаціонарних та мобільних радіостанцій, в тому числі неліцензійних;

– відхилення параметрів радіостанцій від заданих;

– зростання кількості радіозавад промислового походження тощо.

ЕМС *– це здатність* радіоелектронних засобів *(РЕЗ) одночасно функціонувати з обумовленою якістю в реальних умовах експлуатації з*

урахуванням впливу на них ненавмисних радіозавад без створення недопустимих радіозавад іншим РЕЗ.

З визначення випливає, що радіосистема вважається електромагнітно-сумісною з іншими РЕЗ, якщо вона:

- не створює завад іншим системам;
- не сприймає ненавмисні завади від інших систем;
- не створює завади собі.

Збільшення кількості РЕЗ призводить до того, що при одночасній роботі вони починають впливати один на одного. Електромагнітні випромінювання можуть порушити якість роботи РЕЗ, аж до повної неможливості виконання ними своїх функції.

Сукупність електромагнітних полів у певній частині простору, смуги частот та інтервалу часу, що впливають на якість функціонування РЕЗ і РВП, становлять собою ***електромагнітну обстановку*** *(ЕМО) в цій області.*

Поява нового РЕЗ змінює ЕМО в точках, де вже розташовані інші РЕЗ. Ця зміна може погіршити якість функціонування деяких з них.

Електромагнітні випромінювання будь-якого радіопередавача зосереджені як у смузі його робочої частоти (*основне випромінювання*), так і за межами цієї смуги (*неосновне випромінювання*). І основне, і неосновне випромінювання при використанні, наприклад, направлених антен можуть поширюватися як у головній пелюстці діаграми направленості, так у бокових, і в задній.

Щоб домогтися ЕМС при забезпеченні спільної роботи якомога більшої кількості РЕЗ у тому ж радіочастотному просторі, *необхідно підвищити електромагнітну ефективність РЕЗ, тобто поліпшити ті чи інші параметри випромінювання та/або прийому.* За таких ідеальних умов передавальні РЕЗ випромінюють тільки необхідні сигнали в необхідній смузі частот і з мінімальною потужністю тільки в задану точку, а приймальні РЕЗ здійснюють приймання сигналів тільки із заданого напрямку на частоті настроювання.

Завади штучного та природного походження

Суттєвий внесок у формування електромагнітної обстановки вносять різного роду ***радіозавади*** *– електромагнітні випромінювання, які перешкоджають нормальному прийманню та/чи передаванню радіосигналів.*

Джерела радіозавад бувають *штучного* та *природного походження*.

Рецепторами є всі пристрої, які змінюють значення своїх параметрів під впливом електромагнітних завад.

Завади штучного походження поділяються на *ненавмисні* та *організовані* (засобами радіоелектронного придушення).

У свою чергу, *ненавмисні штучні завади* за місцем їх походження поділяються на:

– *міжсистемні*, що діють між РЕЗ різних радіосистем;

– *системні*, що діють усередині систем, наприклад, в окремих трактах та/чи блоках одного і того ж РЕЗ;

– *індустріальні (промислові)*, що зобов'язані своїм походженням електричним та електронним пристроям, які не містять високочастотні тракти.

Міжсистемні завади поділяються на завади, що:

– обумовлені основним випромінюванням РЕЗ призначеним для передачі сигналів і функціонування якого вчиняє шкідливий вплив на даний РЕЗ;

– обумовлені небажаним випромінювання, яке виникає в РЕЗ за межами необхідної смуги частот.

Якщо поява міжсистемних завад пов'язана з випромінюванням, поширенням та прийманням електромагнітних хвиль, то системні завади наводяться всередині РЕЗ найрізноманітнішими шляхами, в тому числі через оточуючий простір за допомогою електромагнітних хвиль.

Системні завади поділяються на:

– паразитні наводки, що обумовлені основним видом електромагнітних коливань в окремих вузлах радіосистеми;

– завади, які виникають під впливом власного випромінювання РЕЗ;

– контактні завади;

– завади, обумовлені перехідними процесами в трактах РЕЗ та самозбудженням їх окремих вузлів.

Паразитні наводки – це електромагнітні коливання, які з'являються в будь-яких частинах радіосистеми за рахунок зв'язків по електричних колах з іншими частинами цієї системи і не передбачені ні принципом дії, ні схемою, ні конструкцією.

Завади, що обумовлені власним випромінюванням РЕЗ, поступають на вхід радіоприймача і в окремі його пристрої через оточуючий простір. Вони відрізняються від міжсистемних завад більш сильними зв'язками між передавальною антеною та приймачами завад, а від паразитних тим, що шлях зв'язку, по якому передається ця завада, включає до себе оточуючий простір та приймальну чи передавальну антену.

Контактні завади створюються внаслідок випромінювання струмопровідних контактів при дії на них електромагнітного поля. Найчастіше виникають при дії електромагнітного поля на контакти зі змінним опором РПП, що рухаються в ближній зоні цього поля, їх рівень та характер залежать від потужності та частотного спектра електромагнітного поля. Особливість цих завад – це те, що їх джерелами служать пасивні елементи. Механізмами утворення контактних завад є:

– нелінійна залежність магнітної індукції від зміни напруженості зовнішнього магнітного поля, яка характерна для матеріалів на основі заліза;

– нелінійні властивості напівпровідникових переходів, утворених оксидованими поверхнями та металевими контактами.

Контактні завади необхідно враховувати особливо при розміщенні РЕЗ та РВП на рухомих об'єктах.

Перехідні процеси викликають появу специфічних завад у ланцюгах РЕЗ, що обумовлено дуже широким спектром їх коливань, внаслідок чого росте кількість можливих шляхів передачі окремих складових спектра.

Завади, що обумовлені самозбудженням, виникають внаслідок генерації електромагнітних коливань електричними колами, які не призначені для цих цілей. Паразитне збудження порушує функціонування радіоелектронних вузлів, в яких воно виникає, і може стати джерелом наводок для інших блоків та пристроїв.

Індустріальні завади – це електромагнітні явища, спектральні складові яких знаходяться в смузі радіочастот, а джерелами є електричні й електронні пристрої різного призначення. Вони поширюються по дротах і у відкритому просторі та заважають функціонуванню радіосистем.

Джерела цих завад поділяються на декілька груп:

– електронні пристрої побутового, комунального та іншого призначення, які експлуатуються в житлових приміщеннях або підключаються до їх електромереж (пилососи, холодильники, електропраски, кухонні плити, швейні електромашини, електроінструменти, ліфти, касові апарати тощо);

– наземний міський та залізничний електротранспорт (трамваї, тролейбуси, електровози, тягові підстанції тощо);

– системи запалювання двигунів внутрішнього згоряння (автомобілів, мотоциклів, моторних човнів, бензинових пилок, газонокосарок тощо);

– високочастотні установки промислового, наукового, медичного та побутового призначення;

– лінії електроживлення та електричні підстанції;

– світильники з газорозрядними (люмінесцентними) лампами тощо.

До ***завад природного походження*** *відносяться електромагнітні завади, джерелами яких являються природні фізичні явища*:

– *внутрішні шуми* – це електромагнітні коливання, виникнення яких обумовлено будовою речовини, фізичною сутністю електричних струмів електронних приладів, якістю та чистотою матеріалів, що застосовуються при виготовленні елементів електронних схем та електронних приладів;

– *неземні шуми* – електромагнітні випромінювання космічних об’єктів, що знаходяться за межами Землі та її атмосфери ;

– *атмосферні завади* – випромінювання, які своїм походженням зобов'язані фізичним явищам, які відбуваються в земній атмосфері;

– *завади при поширенні радіохвиль* – їх дія проявляється в коливаннях (затуханнях) рівня сигналу, що приймається, та його спотворенні та пов’язані з такими явищами як відбиття, розсіювання, поглинання радіохвиль, зміна траєкторії променю, доплерівський ефект тощо.

За спектральними і часовими характеристиками виділяють *зосереджені, імпульсні, флуктуаційні завади*. Імпульсні та флуктуаційні завади є широкосмуговими.

Зосереджена завада являє собою вузькосмугове коливання, параметри якого повільно змінюються (в порівнянні з центральною частотою коливань) або залишаються постійними в часі.

Флуктуаційну заваду можна розглядати як граничний випадок імпульсної завади, коли відбувається накладення в часі випадкового числа імпульсів з випадковими амплітудами. Такою завадою можуть бути космічні шуми, внутрішні шуми радіоапаратури тощо.

Вплив випромінювань РЕЗ на формування електромагнітної обстановки.

Раціональне використання РЧР суттєво залежить від *технічних характеристик РЕЗ.* До найважливіших характеристик, які впливають на забезпечення ЕМС, відносять:

– потужність і частоту випромінювання РЕЗ;

– ширину смуги частот радіовипромінювання;

– вид модуляції тощо.

На підставі *Регламенту радіозв'я*зку здійснюється планування частот, у відповідності з яким провадиться їх виділення і присвоєння різним радіослужбам.

Виділений діапазон радіочастот – це інтервал частот, виділений для однієї чи декількох радіослужб згідно з міжнародним чи національним регламентом.

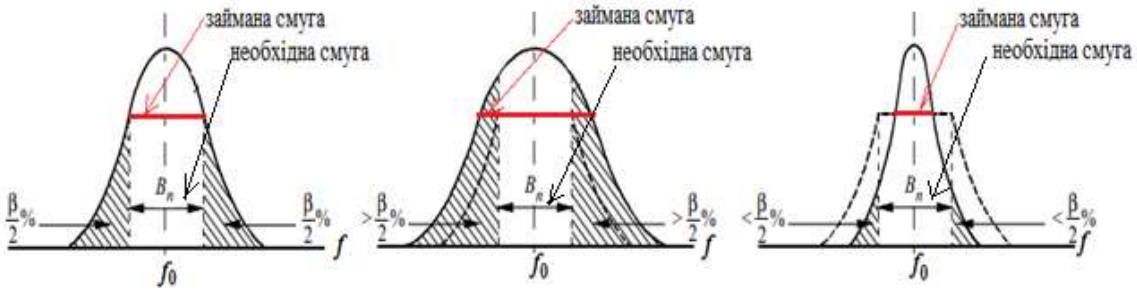
Присвоєна радіочастота *– це частота, що відповідає середині присвоєної радіостанції смуги радіочастот.*

Допустимим відхиленням радіочастоти *називається максимально допустиме відхилення середньої частоти смуги частот, яку займає випромінювання, від присвоєної частоти або характерної частоти випромінювання від відносної частоти.*

Займана смуга частот *радіовипромінювання визначається смугою частот, за границями якої випромінюється не більше ніж задана частина β загальної потужності РЕЗ.* При цьому в займаній смузі частот зосереджено (100 – β)% всієї потужності, що випромінюється антеною РЕЗ, а за верхньою та нижньою границями зосереджено по 0,5•β % потужності (рис. 1.19.а). Вважають, що β = 1% від загальної потужності випромінювання, але в залежності від виду випромінювання значення *β* можуть бути і іншими.

Необхідною смугою частот *певного класу радіовипромінювання називається мінімальна смуга частот, необхідна для передавання повідомлень із необхідною швидкістю та заданою якістю за певних умов.*

Формули для визначення необхідної смуги частот радіопередавальних пристроїв визначають за формулами, що наведені в ГОСТ 30318-95.



а) б) в)

Рис. 1.19 – Типи випромінювань:
а – оптимальне; б – ширше за оптимальне; в – вузьке.

Присвоєна смуга радіочастот *– це смуга частот, у границях якої радіостанції дозволено випромінювання.* Ширина присвоєної смуги частот дорівнює ширині необхідної смуги частот плюс подвоєне абсолютне значення відхилення частоти, що допускається.

Ширина займаної смуги частот являється фактичного смугою, зайнятою радіовипромінюванням, а ширина необхідної смуги є теоретичною, якій повинна відповідати фактична смуга частот певного класу радіовипромінювання.

В залежності від співвідношення між шириною займаної смуги радіочастот та шириною необхідної смуги у відповідності з Рекомендаціями *ITU-R SM.328-11* розрізняють три види випромінювань (рис. 1.19):

- *оптимальне* – коли необхідна і займана смуги співпадають;
- *ширше* за оптимальне;
- *вужче* за оптимальне.

У більшості випадків радіовипромінювання РЕЗ є недосконалими – ширше оптимального, що негативно позначається на вирішенні проблем, пов'язаних із необхідністю забезпечення ЕМС.

У випадку вузьких випромінювань ЕМС РЕЗ покращується, але в цьому випадку можливі втрати інформації через спотворення повідомлень, що передаються, та зниження швидкості передачі.

Допустиме відхилення частоти *– це максимально допустиме відхилення середньої частоти смуги частот радіовипромінювання від присвоєної радіочастоти або характерної частоти радіовипромінювання від відносної радіочастоти.*

В загальному спектрі радіовипромінювань РЕЗ ***основне*** випромінювання супроводжується ***небажаними*** випромінюваннями *на гармоніках та субгармоніках, випромінюваннями на комбінаційних частотах*, крім цього спостерігаються також *інтермодуляційні, шумові та паразитні випромінювання*.

Приклад загального спектру радіовипромінювань РЕЗ наведений на рис.1.20.

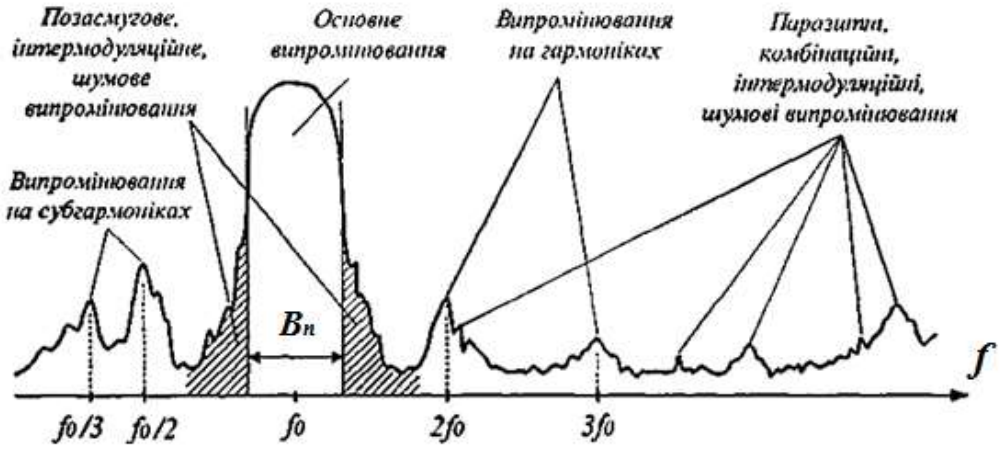


Рис. 1.20 – Приклад спектру випромінювання РЕЗ

Основні та небажані випромінювання РЕЗ

Основні випромінювання РЕЗ *– це радіовипромінювання, що знаходяться в межах необхідної смуги $B_н$ радіочастот*. На них припадає основна частка випромінюваної енергії, тому вони являються найбільш

важливою складовою частиною групового сигналу, який визначає електромагнітну обстановку в місці спостереження.

Основне випромінювання характеризується наступними параметрами:

- несівна частота;
- відхилення частоти;
- ширина необхідної смуги частот;
- потужність;
- тип та параметри модуляції тощо.

Вихідна потужність РЕЗ, що поступає в антенно-фідерний тракт, є одним із найважливіших його параметрів. Відомості про потужність основного випромінювання РЕЗ наводяться в технічній документації. Вихідна потужність може характеризуватися різними значеннями - *потужністю несівної, середньою, піковою, імпульсною.*

Всі випромінювання РЕЗ за межами необхідної смуги $B_н$ *відносять до* ***небажаних випромінювань,*** до складу яких входять:

- побічні випромінювання;
- поза смугові випромінювання.

Шляхи поширення небажаних радіовипромінювань різноманітні: через антенно-фідерний тракт, кабелі, з'єднувачі та монтажні дроти, по колах електроживлення, через вентиляційні отвори в кожухах радіообладнання тощо. Причини, які викликають появу небажаних випромінювань, різні. Деякі їх складові частини обумовлені процесом модуляції випромінюваного сигналу, інші – нелінійними ефектами в окремих каскадах РЕЗ.

Побічні випромінювання *– це випромінювання на частоті або частотах, розміщених за межами ширини необхідної смуги частот, рівень якого може бути понижений без будь-яких втрат для відповідної передачі повідомлень називають.*

До побічних випромінювань відносять:

- випромінювання на гармоніках;
- паразитні випромінювання;
- продукти інтермодуляції та частотних перетворень.

Інтермодуляційні випромінювання – це побічні випромінювання, що виникають в результаті дії на нелінійні елементи високочастотного тракту РЕЗ коливань власного генератора та зовнішнього електромагнітного поля. Їх поява можлива в тому випадку, коли декілька передавачів працюють на одну широкосмугову антену або коли їх антени знаходяться безпосередньо одна біля одної настільки близько, що між ними утворюються непередбачені їх конструкцією електромагнітні зв'язки.

Позасмугові випромінювання *– це всі небажані радіовипромінювання на частоті або в смугах частот, які безпосередньо примикають до необхідної смуги радіочастот, і є результатом процесу модуляції, але не включають до себе побічних випромінювань.*

Позасмугові випромінювання обумовлені використанням сигналів із більшою шириною спектра, ніж це необхідно для виконання радіопередавачем своїх цільових функцій (наприклад, імпульсів із надзвичайно крутими фронтами), нелінійністю, амплітудною та фазовою характеристиками тракту, застосуванням модулюючих сигналів із надмірною амплітудою та наступним її обмеженням, квантуванням сигналів тощо.

На характер позасмугових випромінювань в основному впливають:

- форма модулюючих сигналів;
- нелінійність модуляційної характеристики;
- перемодуляція;
- обмеження амплітуди сигналу тощо.

Для оцінки швидкості спадання інтенсивності позасмугового випромінювання РЕЗ використовується ***ширина смуги частот B_x на рівні мінус X дБ*** відносно основного випромінювання (рис.1.21.).

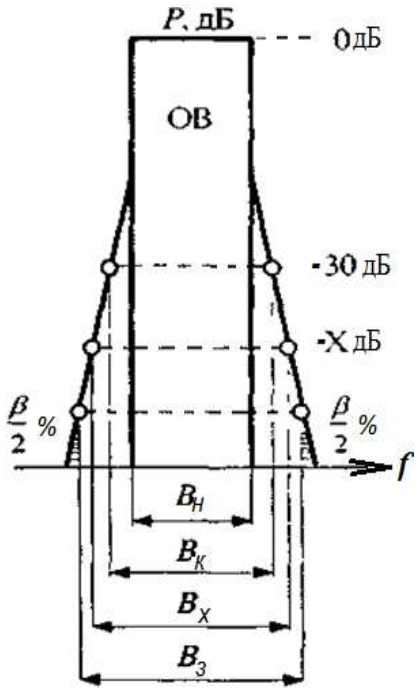


Рис.1.21 – Основне (ОВ) та позасмугові випромінювання РЕЗ:

$B_н$ - ширина необхідної смуги частот;

$B_к$ - ширина контрольної смуги частот;

$B_х$ - ширина смуги частот на рівні мінус Х дБ;

$B_З$ - ширина займаної смуги частот.

Контрольні запитання

1. Що таке ЕМС та ЕМО?
2. Які завади відносять до ненавмисних завад штучного походження?
3. Які завади відносять до завад природного походження?
4. Які характеристики радіосистем впливають на забезпечення ЕМС РЕЗ?
5. Які параметри характеризують основне випромінювання РЕЗ?
6. Як класифікують випромінювання в залежності від співвідношення між шириною займаної смуги радіочастот та шириною необхідної смуги?
7. Що відносять до небажаних випромінювань, якими параметрами вони характеризуються?
8. Що таке побічні випромінювання та яка природа їх виникнення?
9. Що таке позасмугові випромінювання та чому вони виникають?

РОЗДІЛ 2. ОСНОВИ ПОБУДОВИ РАДІОПЕРЕДАВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

2.1. Структура і основні характеристики радіопередавачів

Склад та призначення основних елементів радіопередавачів

Для передачі сигналів по радіолінії потрібен *радіопередавальний пристрій*, який є сукупністю технічних засобів, що знаходяться між джерелом повідомлення та середовищем розповсюдження радіохвиль (рис.2.1).

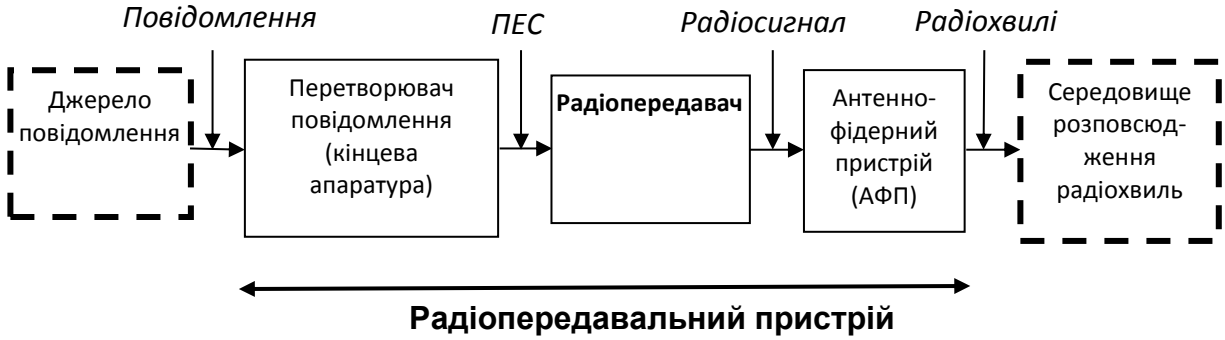


Рис.2.1 – Структура радіопередавального пристрою

Радіопередавальний пристрій включає наступні елементи:

– перетворювач повідомлення (перетворює повідомлення в ПЕС);

– радіопередавач (перетворює ПЕС в радіосигнал);

– АФП (перетворює радіосигнал в радіохвилі).

Перетворювач повідомлення (передавальна частина кінцевої апаратури) перетворює повідомлення в первинний електричний сигнал. Пристрої, що виконують вказані перетворення - мікрофон, телефонний апарат, телеграфний ключ, телеграфний апарат тощо.

Радіопередавачем *називається радіотехнічний пристрій, що перетворює первинні електричні сигнали в радіосигнали певної потужності, необхідної для забезпечення радіозв'язку на заданій відстані з необхідною якістю.*

Радіопередавач виконує наступні основні функції:

– модуляцію несівної сигналом, який містить дані для передачі (перетворення ПЕС в сигнал необхідного виду випромінювання);

– формування необхідного частотного діапазону для передачі радіосигналу;

– підсилення радіосигналу до необхідної потужності.

Антенно-фідерний пристрій (*антена*) забезпечує передачу сформованих радіопередавачем сигналів в антену з послідуючим випромінюванням цих сигналів в навколишнє середовище.

Реальна структура схема передавача визначається його цільовим призначенням та вимогами, що ставляться до нього, але, як правило, включає наступні елементи: *збуджувач, тракт підсилення та узгоджувальний пристрій* (рис.2.2).

Рис.2.2 – Структура радіопередавача

Збуджувач є джерелом несівних коливань. В ньому здійснюється процес модуляції, тобто формуються всі види сигналів, крім імпульсних та амплітудно-модульованих сигналів (імпульсні та амплітудно-модульовані сигнали, як правило, формуються в вихідних каскадах передавачів).

З метою компенсації подальшого затухання сигналу, що розповсюджується на трасі радіозв'язку, коливання збуджувача підсилюються до величини необхідної потужності. Ця функція передавача реалізується в *тракті підсилення*, який містить каскади попереднього підсилення (проміжні каскади) та вихідний каскад.

Найкращі умови для передачі потужності від вихідного каскаду тракту підсилення до антени забезпечує так званий *узгоджувальний пристрій*, необхідність якого диктується недостатньою пристосованістю електричних параметрів антени (головним чином – її вхідного опору) до параметрів вихідного каскаду.

Основні технічні характеристики радіопередавачів

Основні характеристики радіопередавачів можна поділити за прикметами на три групи:

- за ціллю та областю застосування;
- за пристосовністю до експлуатації;
- за раціональністю техніко - економічних рішень.

В першу групу входять:

- діапазон робочих частот;
- потужність передавача;
- види сигналів (класи випромінювання);
- нестабільність частоти;
- ступінь ослаблення неосновних випромінювань;
- час перебудови з однієї частоти на іншу;
- антени, що застосовуються
- джерела первинного електроживлення, промисловий ККД;
- термін безперервної роботи;
- маса та габарити.

Другу групу складають:

- показники надійності (безвідмовність, довговічність, ремонтопридатність, економічність);
- ергономічні показники (наприклад, показники пристосованості до існування персоналу в обмеженому просторі, показники технічної естетики та ін.);
- показники зручності технічного обслуговування, ремонту та збереження;
- показники транспортабельності;
- показники безпеки персоналу;
- показники стійкості до впливу зовнішніх факторів тощо.

Третю групу складають показники, що характеризують рівень стандартизації та проектної уніфікації виробу (ступінь насиченості виробу стандартними елементами).

Розглянемо деякі з них більш детально:

1. *Діапазон робочих частот* – це смуга частот, в межах якої здійснюється робота радіостанції ($f_{мін}$....$f_{макс}$).

На вибір діапазону робочих частот радіостанцій впливають:

- реальна зайнятість ділянок радіочастотного спектру спеціальними службами;
- ширина смуги частот радіосигналу;

– необхідна кількістю робочих частот;
– ефективність антенних пристроїв та їх габарити;
– дальністю радіозв’язку.

Діапазон робочих частот характеризується *коефіцієнтом перекриття по частоті*:

$$K_f = \frac{f_{\text{макс}}}{f_{\text{мін}}}.$$

Величина K_f встановлюється в залежності від цільового призначення радіостанції і може знаходитися в інтервалі від 1,1 до декількох десятків і навіть сотень.

Але, слід відмітити, що з ростом K_f при реалізації такого пристрою виникають деякі труднощі:

– важко забезпечити постійність навантаження каскадів підсилення;
– важко формувати каскади з заданими параметрами;
– важко мінімізувати кількість передавальних антен;
– важко боротися з побічними коливаннями.

В діапазоні робочих частот передавача частота може перестроюватися плавно або дискретно, настроюючись на одну із частот, що складають сітку робочих частот передавача з відповідним *кроком сітки* (Δf_c).

Кількість таких фіксованих частот для заданого діапазону визначається наступною формулою:

$$N_f = \frac{f_{max} - f_{min}}{\Delta f_c} + 1.$$

В сучасних передавачах реалізовано крок сітки 1 Гц, що дозволяє більш ефективно уникати завад.

2. *Нестабільність частоти* випромінювання радіосигналів визначає стійкість і надійність радіозв'язку, можливість створення завад в сусідніх каналах зв'язку, входження в зв'язок без пошуку кореспондентів і ведення радіозв'язку без підстроювання радіоприймача по сигналу кореспондента. *Нестабільність частоти* може визначатися, як:

– абсолютна – $\Delta f = |f_{\text{ном}} - f|$;
– відносна – $\delta f = \Delta f / f_{\text{ном}}$.

3. *Ступінь ослаблення неосновних випромінювань*. Неосновне випромінювання – це випромінювання, що знаходиться поза межами основного сигналу. До їх складу входять побічні та поза смугові випромінювання.

4. *Потужність радіопередавача* визначає рівень сигналу в точці прийому, і, отже, дальність радіозв'язку. Для всіх видів телефонних радіосигналів (крім ОМ) середня потужність вимірюється при відсутності первинного сигналу, а для радіосигналів з ОМ – визначається піковою потужністю радіосигналу при максимальному значенні первинного сигналу, що модулює. Для телеграфних і цифрових радіосигналів потужність оцінюється середньою потужністю, що підводиться до антени під час передачі струмової (позитивної) посилки або символу «1» первинного електричного сигналу.

Класифікація радіопередавальних пристроїв

По області застосування (по призначенню):

- зв’язкові;
- радіомовні;
- телевізійні;
- радіолокаційні;
- радіонавігаційні;
- пристрої завад тощо.

В подальшому будемо розглядати тільки зв’язкові передавачі.

По діапазону частот:

- КХ (діапазон № 7);
- УКХ (діапазон № 8);
- широкодіапазонні.

По потужності:

- малої потужності (Рвих ≤ 100 Вт):
    - I група (Рвих ≤ 1 Вт);
    - II група (1 Вт < Рвих ≤ 10 Вт);
    - III група (10 Вт < Рвих ≤ 100 Вт);
- середньої потужності (100 Вт < Рвих ≤ 1000 Вт);
- великої потужності (Рвих > 1000 Вт).

По місцю розташування:

- стаціонарні;
- рухомі:
- переносні;
- бортові (автомобільні, танкові, корабельні…).

По виду повідомлень, що передаються:

- телефонні;

– телеграфні;
– передача даних.

По типу активних електронних приладів у вихідних каскадах підсилювача:

– лампові;
– напівпровідникові;
– комбіновані…

По ступені автоматизації:

– неавтоматизовані;
– автоматизовані.

Контрольні запитання

1. З яких елементів складається радіопередавальний пристрій?
2. Які функції виконує радіопередавач?
3. З яких елементів складається радіопередавач?
4. Які основні характеристики радіопередавача?

2.2. Загальні принципи побудови збуджувачів радіопередавачів

Загальна структура типового збуджувача

До складу кожного радіопередавального пристрою входить збуджувач, який визначає частоту та вид модуляції його вихідних коливань.

Збуджувач – це пристрій, який виконує наступні основні функції:

– синтезує (формує) робочу сітку частот у заданому діапазоні;
– здійснює перетворення первинного електричного сигналу (ПЕС) у високочастотний сигнал (радіосигнал);
– забезпечує перенесення радіосигналу на робочу частоту.

В загальному випадку збуджувач (рис. 2.3) включає наступні елементи:

– пристрій формування радіосигналів, який здійснює модуляцію ВЧ-коливань первинним електричним сигналом або лінійне перенесення сигналу по частоті;
– тракт перенесення радіосигналів в робочий діапазон;
– синтезатор опорних частот і дискретної сітки частот.

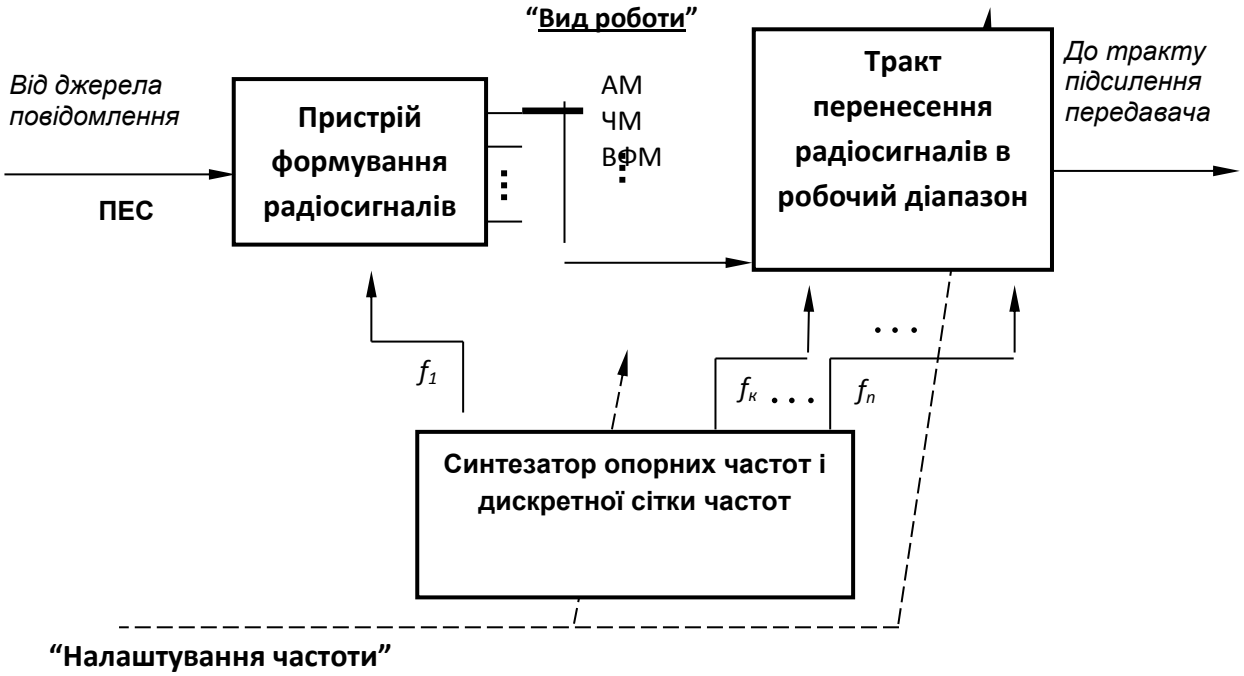


Рис. 2.3 – Узагальнена структурна схема типового збуджувача

Основні параметри збуджувача радіопередавача:

- діапазон частот;
- характер зміни частоти (плавний або дискретний);
- число фіксованих частот (або шаг сітки частот);
- нестабільність частоти та фази;
- рівень побічних випромінювань;
- спосіб управління (ручний або дистанційний);
- швидкість перебудови частоти (інерційність);
- види робіт (види модуляцій);
- рівень вихідного сигналу на заданому опорі тощо.

При формуванні радіосигналів намагаються максимально виконати наступні умови:

- зберегти точність і стійкість робочих частот на виході синтезатора збуджувача;
- укласти спектр радіосигналів в межі необхідної смуги;
- звести до мінімуму нелінійні, амплітудно-частотні і фазочастотні спотворення сигналу;
- виключити попадання до вихідного радіосигналу адитивних завад (флуктуаційних шумів, фону змінного струму тощо).

Для найкращої реалізації цих умов необхідно радіосигнал формувати спочатку на достатньо низьких фіксованих частотах, а потім переносити у робочий діапазон.

Принцип роботи автогенератора *(АГ)*

Одним з основних елементів синтезатора збуджувача для формування коливань високої частоти є високо стабільний ***автогенератор***, який призначений для перетворення енергії джерела постійного струму в енергію незатухаючих електричних коливань, які виникають без стороннього впливу при включенні джерела живлення. Саме опорний генератор визначає загальну нестабільність частоти збуджувача. Автогенератор можна представити як підсилювач із позитивним зворотним зв'язком, що навантажений на коливальний контур (рис. 2.4).

Рис. 2.4 – Узагальнена схема автогенератора

Таким чином, автогенератор включає в себе наступні вузли:

– підсилювальний(активний) елемент (електронна лампа, транзистор тощо);

– навантаження підсилювального елемента в АГ – це, як правило, LC-коливальний контур;

– ланцюг позитивного зворотного зв'язку – пасивний чотириполюсник із коефіцієнтом передачі β <1;

– стабілізоване джерело живлення.

Як відомо, в автогенераторі незатухаючі стаціонарні коливання виникають при виконанні двох умов:

– *балансу амплітуд*:

$$S_{\text{сер}} \cdot Z_{\text{екв.}} \cdot K_{\text{ЛЗЗ}} = 1;$$

– *балансу фаз*:

$$\varphi_s + \varphi_z + \varphi_k = 2\pi n,$$

де $S_{\text{сер}}$ – середня крутизна характеристики активного елементу;

$Z_{\text{екв.}}$ – еквівалентний опір коливального контуру;

$K_{\text{ЛЗЗ}}$ – коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв’язку;

φ_s, φ_z, φ_k – фазові кути відповідних елементів АГ: активного елементу, коливального контуру, ланцюга зворотного зв'язку;

$n = 0, 1, 2, 3, \ldots$.

Так як φ_S і φ_K величини постійні і в сумі складають 2π, то для виконання фазових умов збудження і стаціонарного стану АГ φ_Z має бути рівним нулю, тобто частота генеруючих коливань, в ідеальному випадку, дорівнює частоті власних коливань контуру f_0, тому що тільки при цій частоті $\varphi_Z = 0$ і виконуються фазові умови збудження.

Частота (ω) коливання, що генерується, залежить від доданків фазових кутів, кожне з яких в свою чергу залежить від частоти та параметрів, які характеризують властивості елементів схеми (рис.2.4). Таким чином, вираз балансу фаз можна представити наступним чином:

$$\varphi_s(\omega, \alpha) + \varphi_z(\omega, \alpha) + \varphi_k(\omega, \alpha) = 2\pi n,$$

де α − дестабілізуючі фактори.

На частоті (ω+Δω), де приріст Δω виник за рахунок зміни дестабілізуючого фактору α на величину Δα, попередній вираз має вигляд:

$$\varphi_S(\omega + \Delta\omega, \alpha + \Delta\alpha) + \varphi_Z(\omega + \Delta\omega, \alpha + \Delta\alpha) + \varphi_K(\omega + \Delta\omega, \alpha + \Delta\alpha) = 2\pi n$$

Якщо розкласти його в ряд Тейлора та враховувати тільки перші члени цього ряду (так як величини Δω та Δα достатньо малі), отримаємо наступний вираз:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} \approx \frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} + \frac{\frac{\partial\varphi_Z}{\partial\alpha} + \frac{\partial\varphi_K}{\partial\alpha} + \frac{\partial\varphi_S}{\partial\alpha}}{-\omega\left(\frac{\partial\varphi_Z}{\partial\omega} + \frac{\partial\varphi_K}{\partial\omega} + \frac{\partial\varphi_S}{\partial\omega}\right)} \cdot \Delta\alpha,$$

де $\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0}$ − відносна зміна частоти власних коливань (відносна нестабільність резонансної частоти) коливального контуру.

Зазвичай $\frac{\partial\varphi_K}{\partial\omega} << \frac{\partial\varphi_Z}{\partial\omega}$ *і* $\frac{\partial\varphi_S}{\partial\omega} << \frac{\partial\varphi_Z}{\partial\omega}$, то можна записати:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} \approx \frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} + \frac{\frac{\partial\varphi_Z}{\partial\alpha} + \frac{\partial\varphi_K}{\partial\alpha} + \frac{\partial\varphi_S}{\partial\alpha}}{-\omega\frac{\partial\varphi_Z}{\partial\omega}} \cdot \Delta\alpha.$$

Враховуючи, що для паралельного коливального контуру $-\omega\frac{\partial\varphi_Z}{\partial\omega} \approx 2 \cdot Q$, де Q − добротність контуру, отримаємо вираз для ***відносної нестабільності вихідних коливань автогенератора***:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} \approx \frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} + \frac{\frac{\partial\varphi_Z}{\partial\alpha} + \frac{\partial\varphi_K}{\partial\alpha} + \frac{\partial\varphi_S}{\partial\alpha}}{2Q} \cdot \Delta\alpha .$$

Основні практичні висновки з формули для підвищення стабільності вихідної частоти автогенератора:

1) підтримання постійності параметрів коливального контуру автогенератора (тобто зменшити $\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0}$);

2) вибір схеми та режиму роботи генератора таким чином, щоб фазові кути φ_Z, φ_K, φ_S змінювалися би мало під впливом дестабілізуючих факторів α (тобто зменшити чисельник другого доданку формули);

3) зменшення абсолютної зміни дестабілізуючих факторів α (тобто зменшення Δα);

4) компенсація зміни параметрів одних елементів генератора протилежними по характеру змінами інших (температурна компенсація, автоматичне підстроювання частоти…);

5) використання стабілізуючої дії елементів з високою еталонністю і фіксуючою спроможністю (схеми з кварцовими резонаторами).

Пункти 1-4 відносять до *параметричної стабілізації частоти*, а пункт 5 − до *кварцової стабілізації частоти автогенератора*.

Нестабільність частоти власних коливань коливального контуру автогенератора

При великих значеннях добротності контуру (Q >10), що звичайно має місце в АГ, частота власних коливань дорівнює:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_\text{К} \cdot C_\text{К}}} .$$

З цього виразу можна отримати приблизне значення нестабільності частоти коливального контуру:

$$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} \approx -\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta L_\text{К}}{L_\text{К}} + \frac{\Delta C_\text{К}}{C_\text{К}}\right),$$

де ΔL_K, ΔC_K − зміна індуктивності та ємності контуру під впливом дестабілізуючих факторів.

Щоб з'ясувати причини зміни $\Delta L_К$, та $\Delta C_К$ можна проаналізувати вирази для індуктивності та ємності:

$$L_{К[мкГ]} = \frac{\mu \pi^2 D^2 n^2}{\ell} \cdot 10^3,$$

$$C_{К[пФ]} = 0{,}0884 \frac{\varepsilon \cdot S \cdot (m-1)}{d},$$

де D, ℓ і n – діаметр, довжина та кількість витків котушки;
μ – магнітна проникність;
ε – діелектрична проникність середовища;
S – площа пластин, см^2;
m – кількість пластин конденсатора;
d – товща діелектрику, см.

Відповідно до цих формул $L_К$ та $C_К$ можуть змінювати свої значення при зміні лінійних розмірів, зміни діелектричної (ε) та магнітної (μ) проникності тощо.

Можна виділити наступні основні *дестабілізуючі фактори*:

- вплив механічної деформації;
- вплив тиску і властивостей середовища;
- вплив температури;
- вплив міжелектродних ємностей та ємностей послідуючих каскадів схеми;
- вплив монтажних ємностей тощо.

Саме ***параметрична стабілізація*** *спрямована на зменшення впливу цих дестабілізуючих факторів на стабільність частоти автогенератора*.

Розглянемо деякі з цих заходів:

1. *Боротьба зі впливом механічної деформації*:
   - застосування амортизації елементів передавача;
   - застосування жорстких конструкцій;
   - застосування вібростійких елементів;
   - застосування варіометрів та варикапів замість конденсаторів тощо.
2. *Боротьба зі впливом зміни тиску та вологості*:
   - герметизація автогенератора;
   - покриття елементів схеми захисним шаром лаку;
   - використання керамічних конденсаторів замість конденсаторів з повітряним діелектриком.

3. *Боротьба зі впливом температури*:

– використання керамічних конденсаторів замість слюдяних (перші мають менший ТКЄ);

– застосування термокомпенсації коливального контуру;

– розміщення автогенераторів (особливо кварцових) в термостаті тощо.

Принципи побудови АГ збуджувачів із кварцовою стабілізацією вихідних коливань.

Пошук високо добротних коливальних систем для автогенераторів привів до так званих “кварцових резонаторів” (рис.2.5), в яких використовується *прямий та зворотній п'єзоефекти*, що дозволило застосовувати кварцові пластини в якості коливальних систем автогенераторів.

Кварц – це безводний двоокис кремнію. Тільки так званий β-кварц характеризується п’єзоефектом. Включення кварцової пластини в електричну схему здійснюється за допомогою кварцеутримувача. Кварцова пластина, яка покрита з протилежних сторін тонким (10^{-4} мм) шаром срібла (золота, нікелю або платини), разом з кварцеутримувачем утворює кварцовий резонатор, який розміщують в герметичному середовище (балон з вакуумом або воднем).

Рис. 2.5 – Кварцові резонатори

Еквівалентна схема кварцового резонатора зазвичай представляється у вигляді контуру (рис. 2.6.а) з параметрами L_q, C_q, r_q, які визначають механічні та п’єзоелектричні властивості резонатора (C_0 – ємність електродів кварцеутримувача).

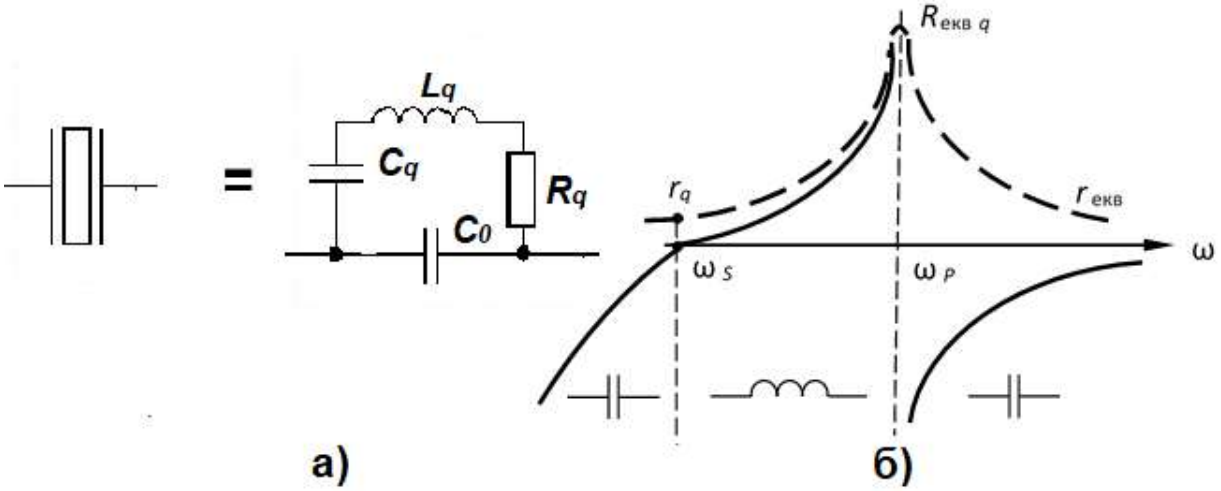


Рис. 2.6 – Еквівалентна схема(а) та опір(б) кварцового резонатора

Відповідно до еквівалентної схеми, можливі дві резонансні частоти (рис. 2.6.б):

– частота послідовного резонансу

$$\omega_S = \frac{1}{\sqrt{L_q \cdot C_q}};$$

– частота паралельного резонансу

$$\omega_P = \frac{1}{\sqrt{L_q \cdot \frac{C_q \cdot C_0}{C_q + C_0}}} = \omega_S \sqrt{1 + \frac{C_q}{C_0}}\,.$$

Внаслідок того, що частоти ω_S, і ω_P стабільні, то використовуючи кварцовий резонатор в АГ в якості послідовного коливального контуру або індуктивності, можна отримати високу стабільність частоти АГ (відносна нестабільність частоти кварцових АГ складає $10^{-6}\ldots10^{-10}$). Кварцові резонатори мають високу добротність, високу фіксуючу спроможність та малий коефіцієнт включення зовнішніх елементів до резонатора. Кварцові резонатори можуть використовуватися не тільки на основній частоті, але й на непарних механічних гармоніках (на парних гармоніках резонанс не відбувається) (рис. 2.7).

В сучасних збуджувачах використовують діапазонно-кварцову стабілізацію частоти. Параметричну стабілізацію застосовують для формування коливань робочої частоти (генераторів плавного діапазону). Для підвищення стабільності частоти кварцового генератора кварцовий резонатор або весь генератор можуть встановлювати в термостат. В АГ можуть використовувати тунельні діоди, діоди Ганна тощо.

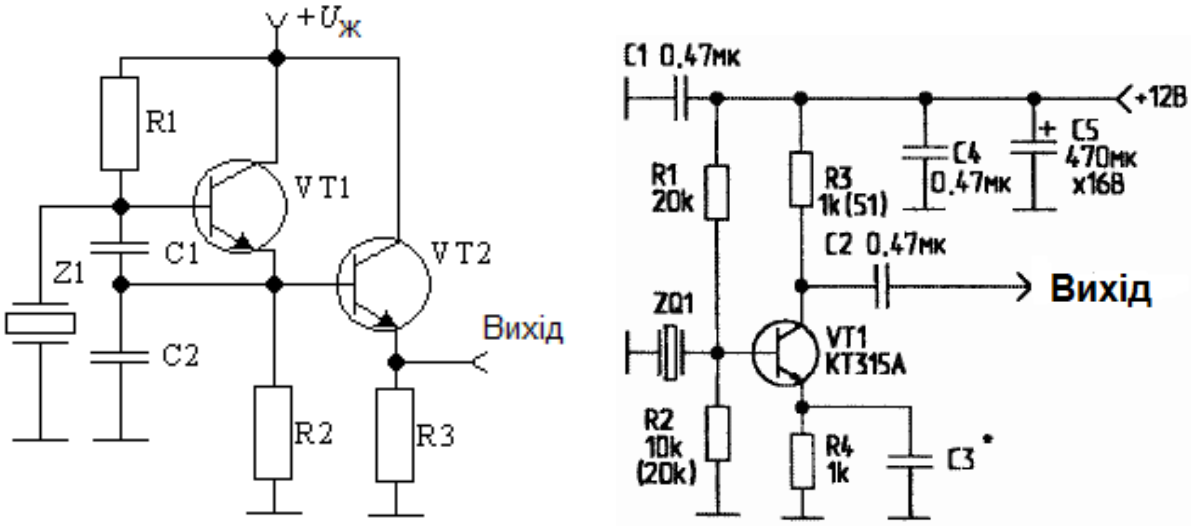


Рис.2.7 – Приклади схеми кварцових АГ

Контрольні запитання

1. З яких елементів складається типовий збуджувач та які функції він виконує?
2. Яке призначення та склад автогенератора збуджувача?
3. Які умови генерації збуджувачем незатухаючих стаціонарних коливань?
4. Назвіть практичні висновки з формули для підвищення стабільності вихідної частоти автогенератора.
5. Які дестабілізуючі фактори впливають на стабільність частоти вихідних коливань та засоби параметричної стабілізації частоти в АГ?
6. Чому кварцовий резонатор може використовуватися в якості коливального контуру та які його переваги?
7. Які особливості використання кварцових резонаторів в автогенераторах?

2.3. Способи формування діапазону робочих частот

Вимоги до систем формування дискретних частот. Методи формування дискретних частот.

Обов’язковим вузлом збуджувача при діапазонно-кварцовій стабілізації є кварцовий автогенератор. Практичні схеми синтезаторів частот радіозасобів досить різноманітні, але можна відзначити наступні основі загальні принципи їх побудови:

– синтезатори частот засновані на використанні високо стабільного опорного коливання з певною частотою, джерелом якого зазвичай є кварцовий генератор;

– для формування великої кількості необхідних частот використовуються дільники, перемножувачі та перетворювачі частоти, що забезпечують використання одного опорного коливання для формування сітки частот;

– забезпечення синтезаторами частот декадної установки частоти збуджувача.

За методами формування (синтезу) дискретних частот і способами фільтрації побічних коливань системи синтезу частот можна поділити на наступні класи:

– системи прямого (пасивного) аналогового синтезу частот (*DAS – Direct Analog Synthesizers*), на основі структури змішувач/фільтр/дільник, при якому вихідна частота формується безпосередньо з опорної частоти за допомогою операцій змішення (додавання або віднімання), фільтрації, множення і ділення;

– системи непрямого (активного) синтезу частот (indirect) на основі фазового автоматичного підстроювання частоти (*PLL – Phase Locked Loop*), при якому вихідна частота формується за допомогою додаткового автогенератора (найчастіше це генератор, що керується напругою (*VCO – Voltage Controlled Oscillator*)), який охоплений петлею ФАПЧ;

– цифрові синтезатори, в яких вихідний сигнал синтезується цифровими методами

– гібридний синтез, що представляє собою комбінацію декількох методів.

Формування сітки дискретних частот методом прямого аналогового синтезу

Прямий синтез *частот забезпечує отримання заданої частоти із частот опорного генератора шляхом простих арифметичних дій: множення, ділення, додавання, віднімання:*

$$f = V[f_0],$$

де V – деякий арифметичний оператор.

Відносна нестабільність сформованих коливань в таких синтезаторах визначається нестабільністю первинного опорного генератора і коригування помилки частоти на виході схеми не передбачається.

Наприклад:

– $f_1 = f_0 \cdot k_1$,

– $f_2 = \frac{f_0}{k_2}$,

– $f_3 = f_0 - \frac{k_5}{k_6} f_0$,

де k_n = 1, 2, 3….

Поточна реалізація прямого частотного синтезу зводиться до знаходження оптимальних операторів, які:

– забезпечують отримання необхідних частот при найменшому числі операцій;

– придатні для отримання більшості з множини вихідних частот.

Прикладами схем синтезаторів прямого синтезу є:

– схема “кварц-хвиля”;

– генератори гармонік;

– інтерполяційні схеми тощо.

В найпростішому варіанті отримати декілька високо стабільних коливань можливо за допомогою одного автогенератора зі змінними кварцовими резонаторами (рис. 2.8):

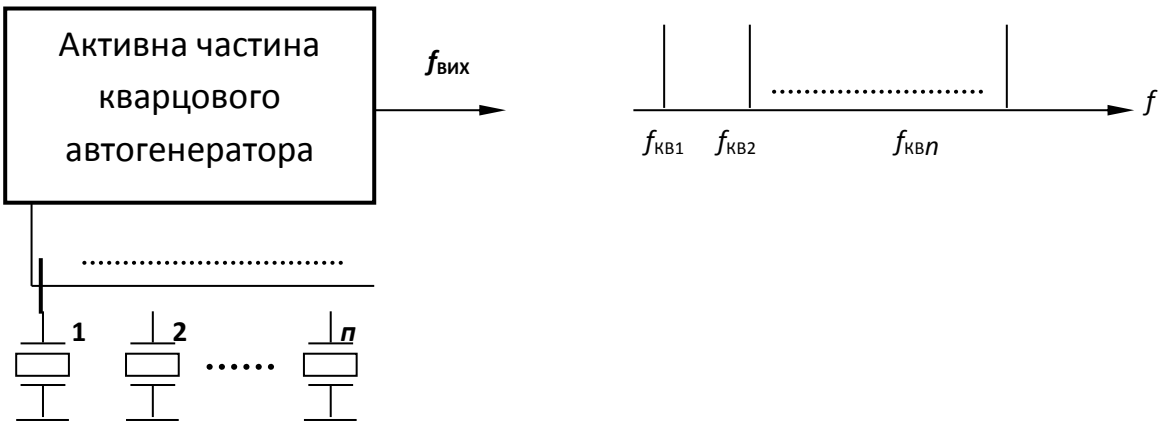


Рис. 2.8 – Схема “кварц-хвиля”

Особливості схеми «кварц-хвиля»:

– простота реалізації;

– обмежена кількість опорних частот;

– використовується в радіозасобах з малою кількістю робочих частот.

Генератори гармонік

В цих схемах велику кількість фіксованих частот отримують із імпульсної послідовності, яка формується із коливань високо стабільного кварцового генератора (рис. 2.9).

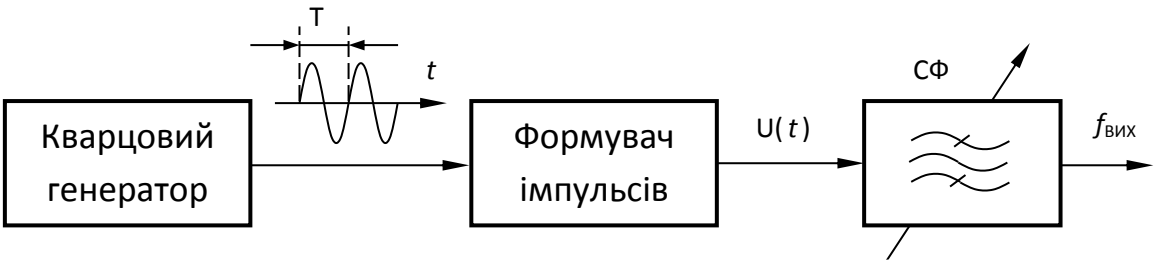
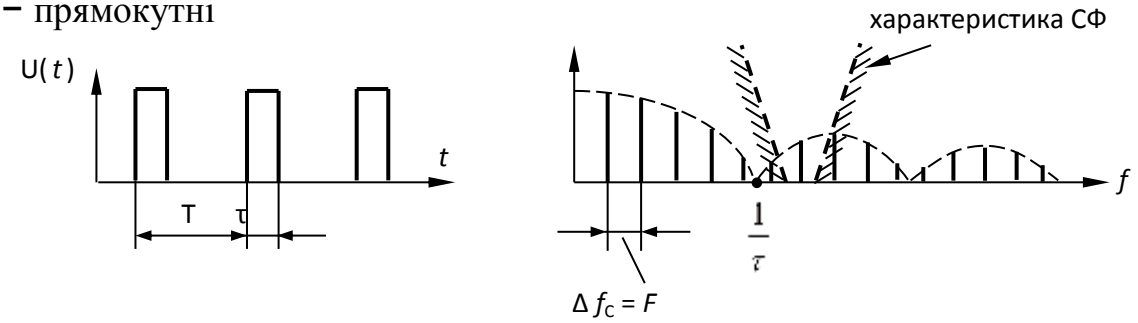


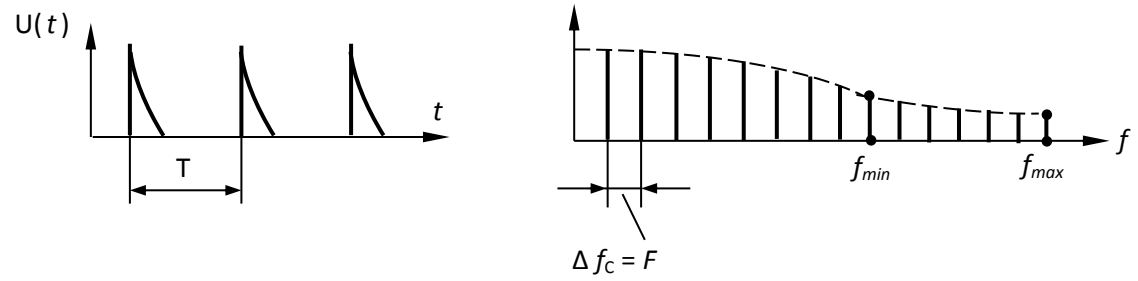
Рис. 2.9 – Узагальнена схема генератора гармонік

Дана схема є різновидністю помножувача частоти. Формувач імпульсів перетворює гармонічне коливання кварцового генератора в послідовність коротких імпульсів різної форми U(t), спектр яких є нескінченним. За допомогою смугового фільтра (СФ), який перестроюється, виділяють одну з гармонік цієї послідовності $f = n \cdot F$, де $F = \frac{1}{T}$ – частота коливань кварцового генератора. На виході формувача імпульсів можуть бути отримані, наприклад, такі різновидності імпульсів (рис. 2.10):

– прямокутні



– пилоподібні



– відеоімпульси

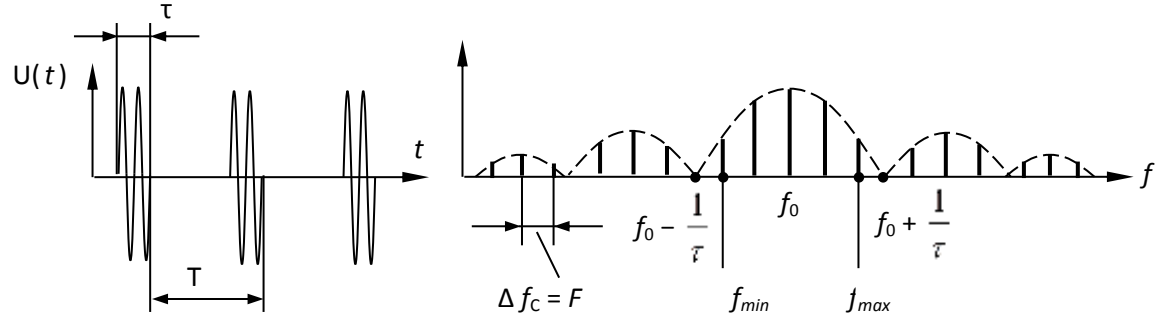


Рис. 2.10 – Сигнали на виході формувача імпульсів

Такі схеми ще називаються селекторами гармонік. Їх недоліками є наступне:

– зі збільшенням номеру гармонік (n) змінюється інтенсивність сигналу (як правило, зменшується, або з'являються «провали»);

– мінімальний крок сітки частот (Δf_C) обмежений (як правило, $\Delta f_C \geq 1$ МГц), що пов'язано з характеристиками СФ по ступені ослаблення сусідніх гармонік.

Інтерполяційний метод формування сітки частот

Даний метод дозволяє збільшити кількість вихідних частот без пропорційного збільшення числа кварцових резонаторів. Схема (рис. 2.11) передбачає наявність двох джерел гармонічних коливань f_1 и f_2 , змішувача та смугового фільтра, що перестроюється.

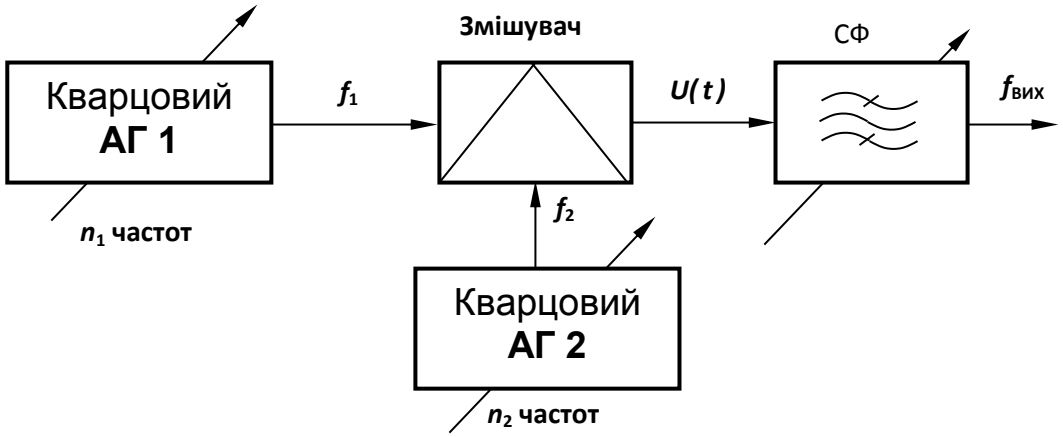


Рис. 2.11 – Інтерполяційна схема

Частоти f_1 и f_2 отримуються від високо стабільних кварцових генераторів та слідують з різними кроками частот Δf_1 и Δf_2:

$$f_1 = k \cdot \Delta f_1, \text{ де } k = 0, 1, 2, \ldots (n_1 - 1),$$

$$f_2 = m \cdot \Delta f_2, \text{ де } m = 0, 1, 2, \ldots (n_2 - 1),$$

n_1, n_2 – кількість частот (резонаторів) відповідно АГ1 та АГ2.

Смуговий фільтр (СФ), що перестроюється, виділяє коливання сумарної(+) або від'ємної(-) комбінацій частот:

$$f_{ВИХ} = f_1 + f_2 \quad \text{або} \quad f_{ВИХ} = f_1 - f_2.$$

Зі збільшенням кількості резонаторів нестабільність вихідних коливань має тенденцію до збільшення, тому що частоти кварцових резонаторів некогерентні. Більш стабільну сітку частот можливо отримати інтерполяційним методом, використовуючи один опорний кварцовий автогенератор та селектори (генератори) гармонік (СГ) із відповідним кроком сітки частот (рис. 2.12):

$$f_1 = k \cdot \Delta f_1,$$
$$f_2 = \ell \cdot \Delta f_2,$$

де Δf_1 и Δf_2 – кроки сітки частот селекторів гармонік.

Частота вихідних коливань при виділенні СФ сумарної складової розраховується наступним чином (рис.2.3.5): $f_{ВИХ} = k \cdot \Delta f_1 + \ell \cdot \Delta f_2$.
Зазвичай вибирають наступне співвідношення кроків сітки:
$\Delta f_2 = 10\Delta f_1$, а $k, \ell = 0, 1, 2, \ldots 9$ (Наприклад: Δf_1=1 кГц, а Δf_2=10 кГц).

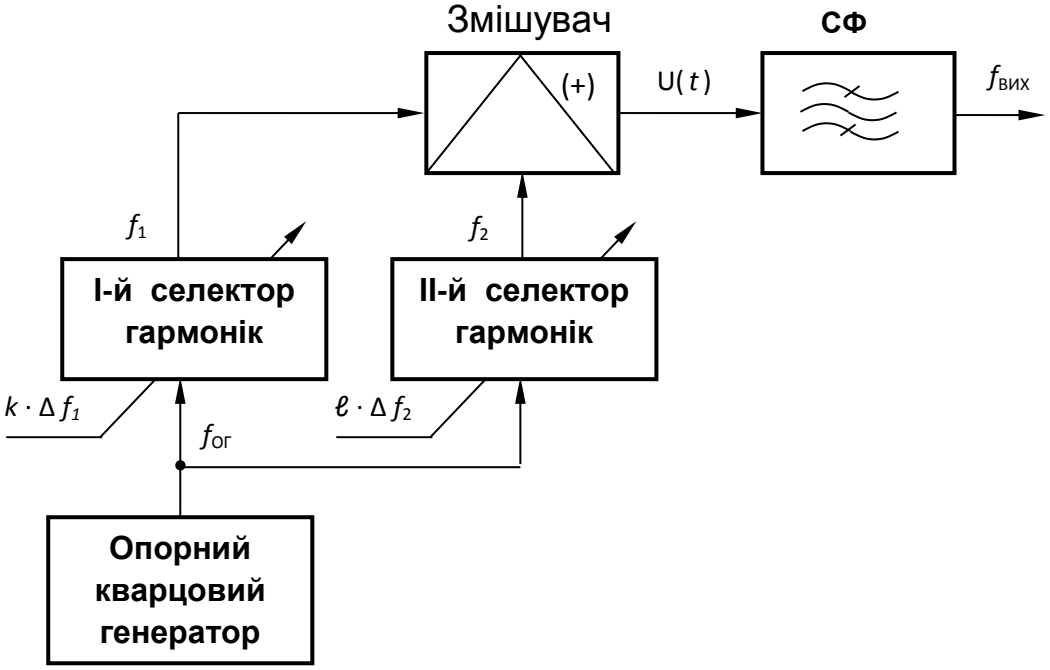


Рис.2.12 – Інтерполяційна схема з одним кварцовим автогенератором

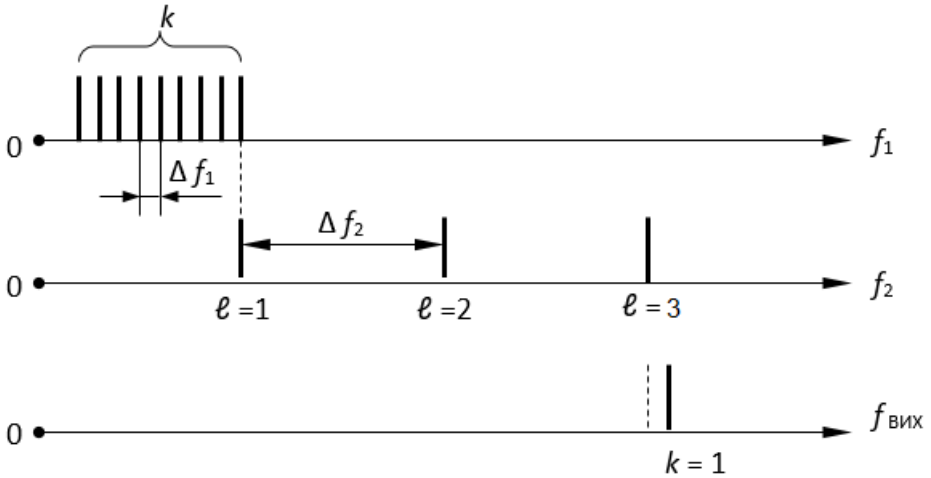


Рис. 2.13 – Принцип формування вихідних коливань

Таким способом будують декадні інтерполяційні схеми. Для розширення діапазону частот схема (рис. 2.12) може бути подовжена шляхом включення в неї ще ряду декадних селекторів і змішувачів з фільтрами. Причому крок

сітки кожного з наступних селекторів повинен бути в 10 разів більше попереднього (рис. 2.14). Частота на виході синтезатора визначається положенням перемикачів СГ кожної декади.

Основним недоліком розглянутих схем є те, що фільтри, які перестроюються за частотою, важко виконати з постійними характеристиками у всьому діапазоні. Тому практичне використання знайшли більш складні інтерполяційні схеми, наприклад, з ідентичними декадами.

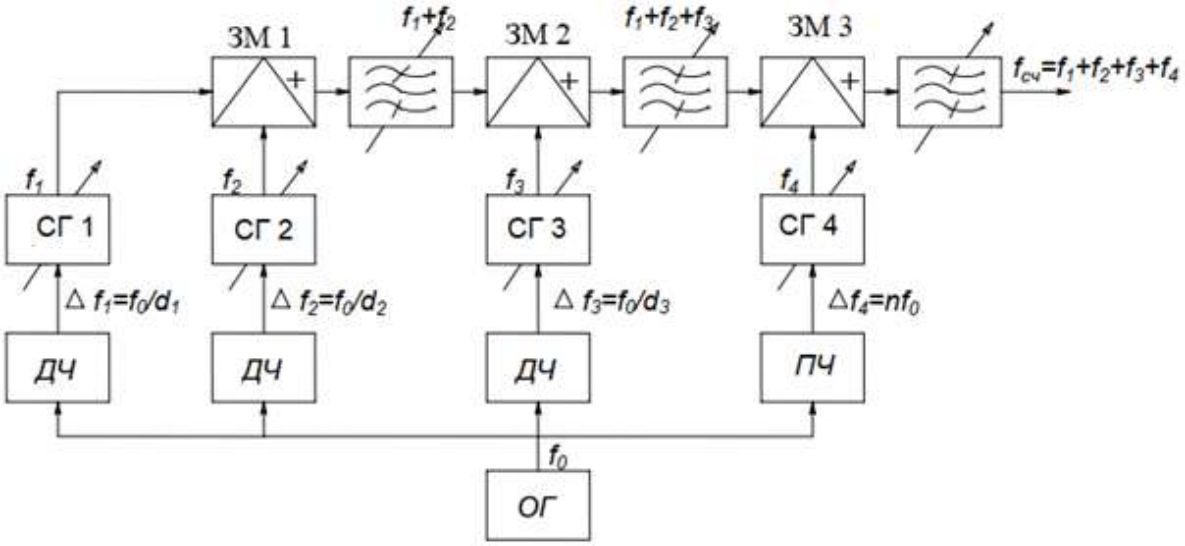


Рис. 2.14 – Варіант інтерполяційної схеми

Отже:

– прямий синтез забезпечує отримання достатньо високо стабільних дискретних частот з достатньо малим кроком сітки в широкому діапазоні, але при цьому необхідна велика кількість перетворень частоти опорного генератора;

– основною проблемою прямого синтезу є придушення побічних і комбінаційних коливань, яка вирішується раціональним вибором опорних частот, застосуванням балансних перетворювачів і ефективних методів фільтрації;

– прямий метод частіше використовується сумісно з непрямими методами синтезу частот.

Формування сітки дискретних частот методом непрямого синтезу

В синтезаторах, що побудовані за методом непрямого синтезу, джерелом вихідних коливань є діапазонний автогенератор гармонійних коливань з параметрично стабілізацією частоти, нестабільність якого

усувається системою *автоматичного підстроювання частоти (АПЧ)* по еталонним (високо стабільним) частотам.

Суть ***АПЧ*** полягає в тому, що вихідні коливання автогенератора (АГ) в тракті приведення частоти перетворюються до деякої постійної частоті $f_{прив}$, яка порівнюється з еталонним значенням частоти $f_{ОП}$ в пристрої порівняння (рис. 2.15). Тракт приведення представляє собою інтерполяційну схему дискретного перетворення частоти «вниз» – $f_{вих}$ до $f_{прив}$. Якщо ці частоти співпадають, то керуюча напруга відсутня, а АГ продовжує генерувати вихідний сигнал відповідної частоти. При розбіжності порівнюваних частот, що може виникати в наслідок дії на АГ дестабілізуючих факторів, формується керуюча напруга ($U_{вих}$), яка подається через фільтр нижніх частот на керований реактивний елемент АГ і змінює величину його реактивності (ємність або індуктивність), що включаються в вихідний коливальний контур, який визначає його вихідну частоту. Частота АГ змінюється до тих пір, поки $f_{прив}$ не наблизиться до еталонної частоти з досить малим залишковим розстроюванням частоти.

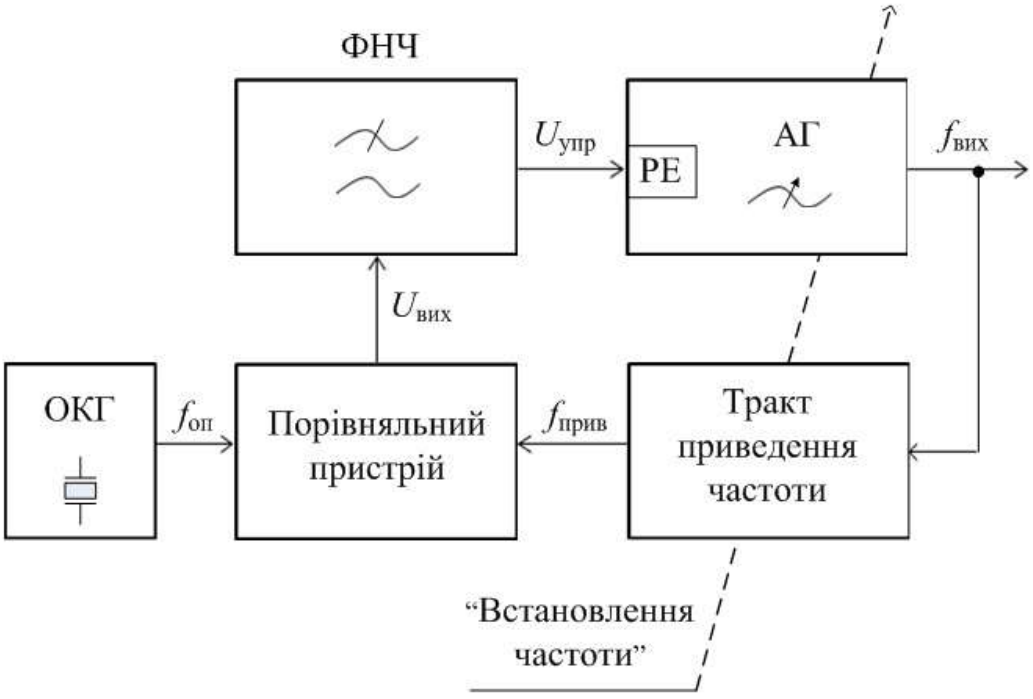


Рис.2.15 – Спрощена схема системи АПЧ

Залежно від пристрою порівняння всі системи АПЧ можна поділити на два основних види:

– системи з *частотним автопідстроюванням частоти* (ЧАПЧ), в яких в якості пристрою порівняння використовуються частотні детектори (ЧД);

– системи з *фазовим автопідстроюванням частоти* (ФАПЧ), що використовують в якості пристрою порівняння фазові детектори (ФД).

Крім того, використовують ще системи з імпульсно-фазовим автопідстроюванням частоти (ІФАП), в яких пристроєм порівняння є імпульсно-фазові детектори (ІФД).

Синтезатори з частотним автопідстроюванням частоти (ЧАПЧ)

Гармонійні коливання з частотою $f_{вих}$, що генеруються керованим автогенератором (АГ), є вихідними коливаннями генератора. Частотний детектор являє собою пристрій, напруга на виході якого пропорційна різниці між частотою вхідного сигналу $f_{АПЧ}$ і частотою, на яку налаштований ЧД ($f_{ЧД}$). Характеристика ЧД $U_{ЧД} = \varphi(f)$ представлена на рис. 2.16.

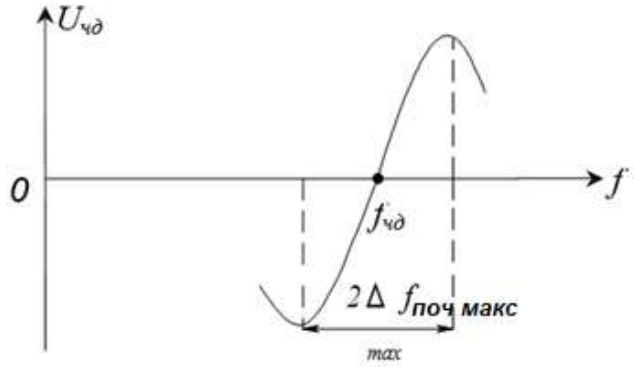


Рис. 2.16 – Характеристика частотного детектора

При відхиленні $f_{прив}$ від $f_{ЧД}$ на виході ЧД формується керуюча напруга $U_{ЧД}$, величина і знак якої визначається величиною і напрямком розстроювання. Керуюча напруга подається через ФНЧ на АГ і змінює його частоту $f_{вих}$ так, щоб зменшити початкове розстроювання. Процес регулювання частоти системою ЧАПЧ графічно зображено на рис.2.17.

Якщо існує початкове відхилення частоти АГ від номінального значення ($\Delta f_{поч}$), на виході ЧД формується напруга $U_{поч}$, яка діє на реактивний елемент АГ і зменшує його розстроювання $\Delta f_{АГ.}$ Це в свою чергу призводить до зменшення керуючої напруги на виході ЧД доки управляюча напруга не досягне величини, відповідної точки перетину цих характеристик (точка 3), яка визначає динамічну рівновагу системи.

Початкове розстроювання частоти зменшується, *але* <u>*не зводиться до «нуля».*</u> Ефективність роботи системи оцінюється виграшом ЧАПЧ:

$$K_{ЧАПЧ} = \Delta f_{поч}/\Delta f_{зал}.$$

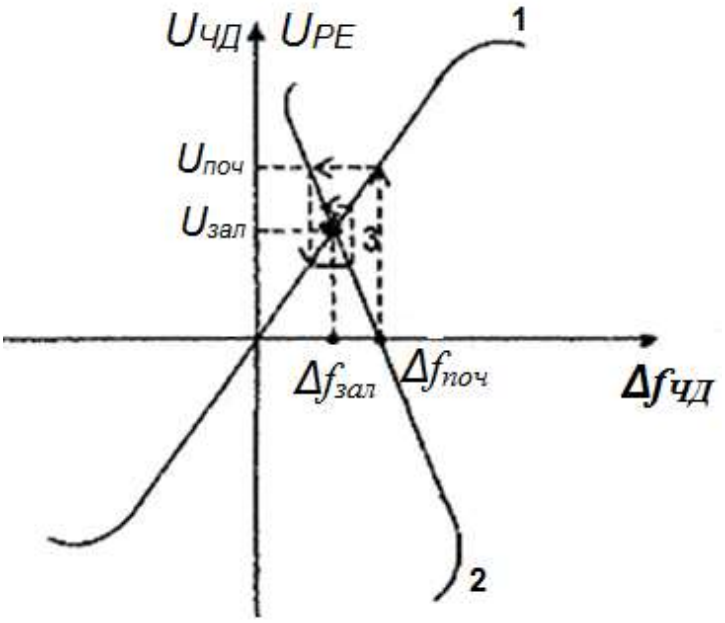


Рис. 2.17 – Принцип регулювання ЧАПЧ
(1 – характеристика ЧД, 2 – характеристика реактивного елементу АГ)

Величина $\Delta f_{зал}$ залежить від крутизни характеристик ЧД і РЕ. Для збільшення виграшу ЧАПЧ треба збільшувати крутизну цих елементів, але є обмеження, що пов'язано з самозбудженням системи.

Максимальне значення початкового розстроювання $\Delta f_{поч_макс}$, яка може бути зменшена системою ЧАПЧ, визначає ***смугу захоплювання*** системи ЧАПЧ:

$$\Delta f_{зах} = 2\Delta f_{поч_макс}.$$

Отже:

– система з ЧАПЧ не забезпечує повного коригування частоти АГ, має місто залишкова похибка регулювання (Δfзал), внаслідок чого, ЧАПЧ окремо не використовується в сучасних синтезаторах частот;

– зменшення відносної нестабільності відбувається на 1-2 порядки;

– ефективно придушуються побічні коливання;

– достатньо широка смуга захоплення системи АПЧ.

Синтезатори з фазовим автопідстроюванням частоти (ФАПЧ)

В системі з ФАПЧ пристроєм порівняння є фазовий детектор (ФД). Керуюча напруга на виході ФД $U_{ФД}$ (рис. 2.18) є пропорційною різниці фаз двох поданих на нього коливань – $f_{пр}$ та $f_{ОГ}$, частоти яких в стаціонарному режимі рівні ($f_{пр} = f_{ОГ}$).

Фазовий кут ($\Delta\varphi(t) = \omega_0 t - \omega_{пр} t$) є поточною різницею фаз опорного кварцового генератора та приведених коливань АГ. Якщо ці частоти нерівні, то і $\Delta\varphi(t)$ буде змінюватися в часі, а управляюча напруга з виходу ФД буде підстроювати частоту вихідних коливань АГ, щоб звести різницю частот до «нуля». При закінченні процесу регулювання $\Delta\omega=0$, тобто $\Delta\omega=\Delta\varphi(t)/dt=0$. Це означає, що $\Delta\varphi$ є постійною величиною, якій відповідає деяка управляюча напруга $U_{упр}$ на реактивному елементі АГ. Таким чином, ФД за допомогою реактивного елементу АГ встановлює та підтримує постійну різницю поточних фаз цих коливань. В *режимі синхронізації* частоти, які порівнюються, будуть однаковими, а стабільність частоти вихідних коливань $U_{вих}$ визначається стабільністю коливань опорного кварцового генератора.

Процес регулювання системи ФАПЧ характеризується *смугою захоплення* та *смугою утримання*. *Смуга захоплення* – це подвоєне значення різниці частот $|\omega_0 - \omega_{пр}|$, на межах якого починається процес регулювання частоти. Під *смугою утримування* системи ФАПЧ розуміють подвоєне значення різниці частот, при якому процес регулювання зривається, що має місце тоді, коли різниця фаз коливань ω_0 *і* $\omega_{пр}$ буде більше $\pm\pi/2$.

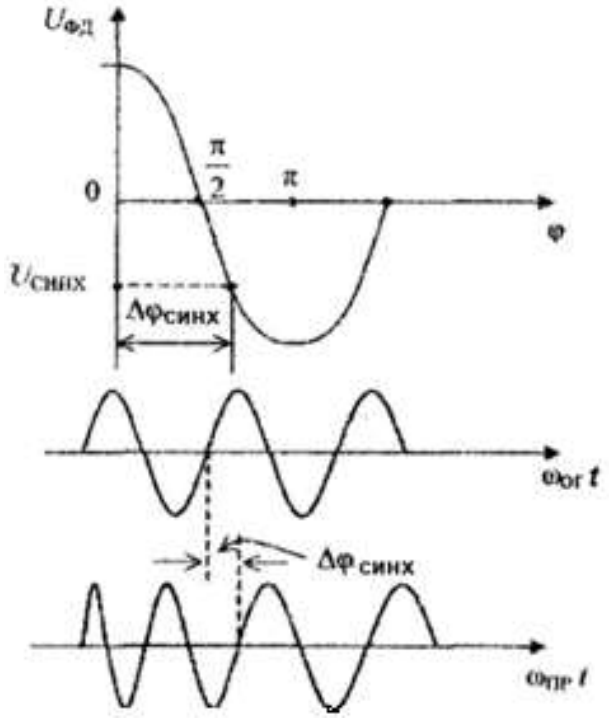


Рис. 2.18 – Принцип регулювання ФАПЧ

Отже:

– система ФАПЧ зводить розбіжність частоти АГ від номінального значення практично до «нуля»;

– смуга захоплення ФАПЧ значно менша за систему ЧАПЧ (складає одиниці кГц);

– для забезпечення регулювання в широкому діапазоні частот використовують систему автопошуку з використанням АГ сигналів пилоподібної форми та декілька ланцюгів АПЧ.

Цифрові синтезатори частот

Використання логічних елементів в синтезаторах частоти зумовило появу нових типів синтезаторів, які називаються *цифровими*. Вони мають значні переваги в порівнянні з аналоговими: більш прості, надійні в експлуатації, мають менші габарити і масу.

Застосування логічних інтегральних схем дозволило майже повністю виключити інтерполяційні перетворювачі частоти, замінивши їх на дільник частоти із змінним коефіцієнтом ділення (ДЗКД). Джерелом вихідних коливань є автогенератор гармонійних коливань (АГ), який автоматично підстроюється системою імпульсно-фазового автоматичного підстроювання частоти (ІФАПЧ) (рис. 2.19).

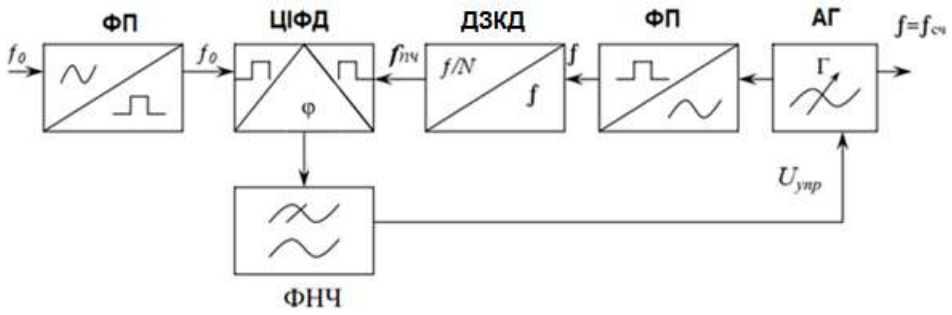


Рис. 2.19 – Цифровий синтезатор частот із системою ІФАПЧ

Формуючий пристрій перетворює гармонійні коливання в послідовність коротких імпульсів тієї ж частоти. Послідовність з частотою f подається на ДЗКД, коефіцієнт ділення (N) якого змінюється в необхідних межах від N_{min} до N_{max} зовнішніми органами управління ДЗКД. На виході ДЗКД формується послідовність імпульсів, частота проходження яких $f_{пч}$ в N раз менше частоти імпульсів на вході: $f_{пч}=f$: N.

Імпульсна послідовність з частотою $f_{пч}$ подається на ЦІФД, де порівнюється з імпульсною послідовністю, що сформована в ФП із гармонійних коливань еталонної частоти f_0. В сталому режимі порівнювані частоти дорівнюють один одному:

$$f_{пч} = f : N = f_0 .$$

Отже, частота коливань на виході синтезатора $f_{сч}=f=Nf_0$ повністю визначається частотою встановленим значенням коефіцієнта ділення N та f_0. Щоб перебудувати синтезатор на сусідню частоту, необхідно змінити на одиницю коефіцієнт ділення, встановивши його, наприклад, в положення (N+1), тоді частота на виході синтезатора буде:

$$f_{сч}=f=(N+1)f_0=Nf_0+f_0 .$$

Інтервал між сусідніми частотами дорівнює частоті порівняння f_0. Для зменшення цього інтервалу необхідно знижувати частоту еталонних коливань f_0, що призводить до збільшення часу нестаціонарних процесів, тривалість яких дорівнює (50…100):f_0. *Відносно низька швидкодія* є недоліком цифрових синтезаторів з ДЗКД на основі ФАПЧ.

Сучасні цифрові синтезатори частот забезпечують стійку роботу на частотах (20…30) МГц. При необхідності формування сітки частот у більш високочастотному діапазону необхідно знижувати частоту слідування імпульсів, що надходять на вхід ДЗКД. Це призводить до зниження швидкості перебудови і збільшення фазових шумів на виході АГ. Підвищити швидкість перебудови і зменшити рівень шумів можна при використанні двох петель ФАПЧ і змішувача.

В практичних схемах цифрових синтезаторів з ДЗКД використовують декадний принцип їх побудови. Кожна декада реалізує підрахунок вхідних імпульсів до десяти, після чого повертається в початковий стан та забезпечує відповідні долі (десяті, соті…) коефіцієнта ділення частоти.

В синтезаторах частоти з ***прямим цифровим синтезом*** (***DDS*** *–Direct Digital Synthesizers*) для формування вихідного сигналу, необхідної форми та частоти з тактового (опорного) коливання використовується цифрова обробка сигналу. В *DDS* відліки синтезованого опорного сигналу обчислюються цифровими методами, після чого вони передаються на цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), де і відбувається їх перетворення в аналогову форму (напругу або струм). Цим він відрізняється від синтезаторів частоти, заснованих на інших принципах, наприклад, ФАПЧ.

Особливістю синтезаторів прямого цифрового синтезу є те, що частота, амплітуда і фаза сигналу, який формується на їх виході, в будь-який момент часу точно відомі і можуть бути запрограмовані. Параметри таких синтезаторів практично не залежать від температури і старіння елементів. Єдиним елементом, який має характерну для аналогових схем нестабільність, є ЦАП. Відмінні технічні характеристики і висока швидкість перебудови частоти та фази синтезаторів *DDS* стали причиною того, що в області частот

до одиниць ГГц вони поступово витісняють синтезатори, що побудовані на основі системи ФАПЧ.

Основними функціональними елементами синтезаторів *DDS* є (рис. 2.20):

– кварцовий опорної генератор;
– акумулятор фази;
– перетворювач фаза-амплітуда;
– ЦАП;
– фільтр нижніх частот;
– пам'ять, яка призначена для зберігання параметрів синтезованого сигналу, таких як частота, фаза, амплітуда, форма тощо.

В кожному такті опорної частоти акумулятор фази (як правило, двійковий лічильник) збільшує своє значення на величину, що записана в комірку пам'яті. В результаті, значення акумулятора фази поступово-лінійно збільшується з часом. Потім, обчислене таким чином в кожному такті значення фази перетворюється в значення амплітуди (в принципі, дане перетворення може бути довільним і залежить від програми). У найбільш поширеному на практиці випадку, для синтезу гармонійних коливань, обчислюється синус поточного значення фази. Результат обчислення подається на вхід ЦАП, вихідний сигнал якого згладжується від результатів дискретизації фільтром нижніх частот.

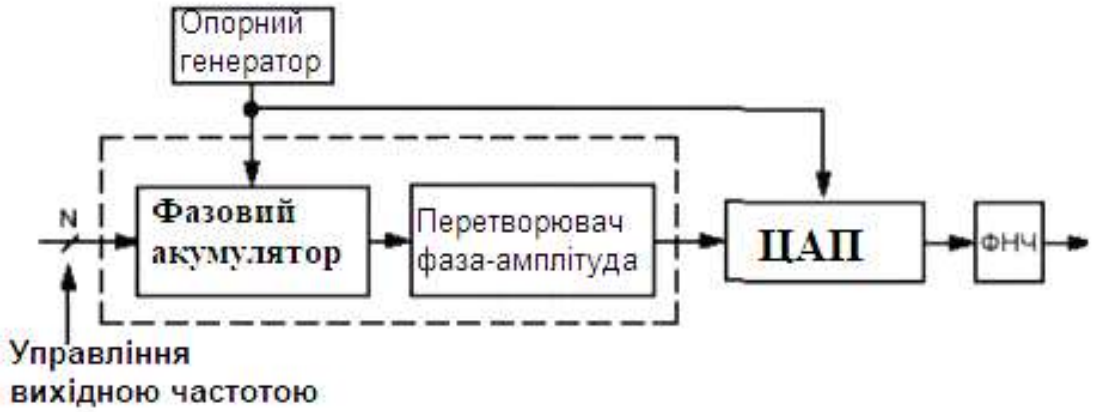


Рис. 2.20 – Спрощена схема синтезатора *DDS*

Прикладом синтезатора *DDS* є мікросхема ***AD9914*** компанії *Analog* Devices, яка має наступні основні характеристики:

– максимальна частота вихідного сигналу – 3,5 ГГц;
– число розрядів вихідного ЦАП – 12;
– SFDR (динамічний діапазон, вільний від паразитних складових) – 92 дБ в смузі 0,5 МГц і 52 дБ – в широкій смузі;

– потужність, що споживається – 3 Вт.

Основними перевагами синтезаторів *DDS*:

– високий роздільна здатність по частоті і фазі (доступні пристрої з кроком перебудови менш 0,00001 Гц, при вихідних частотах від нуля герц до одиниць гігагерц);

– швидка перебудова частоти (або фази);

– перебудова по частоті без розриву фази і без скакання напруги на виході.

Однак цим синтезаторам притаманні і недоліки, а саме:

– обмежений частотний діапазон;

– порівняно великі спотворення сигналу (більш високий рівень негармонійних паразитних складових в спектрі синтезованого сигналу);

– значне енергоспоживання через великий обсяг обчислень.

Контрольні запитання

1. Які особливості формування сітки дискретних частот методом прямого синтезу та які недоліки цих схем? Приклади схем.
2. В чому полягає сутність інтерполяційного методу формування сітки частот?
3. Поясніть принцип роботи схеми систем із автоматичним підстроюванням частоти? Приклади схем.
4. Які параметри порівнюються в системах ЧАПЧ та які їх основні недоліки?
5. Які особливості роботи та переваги систем із ФАПЧ?
6. Назвіть основні типи цифрових синтезаторів частоти, їх особливості, переваги та недоліки.
7. Назвіть склад та поясніть принцип роботи синтезатора *DDS.*

2.4. Формування радіосигналів

Формування дискретних радіосигналів

Процес модуляції ВЧ коливань дискретним первинним сигналом називається *маніпуляцією* (англ. *SK – Shift Keying*). Розрізняють амплітудну, частотну і фазову маніпуляції у відповідності з параметром ВЧ коливання, що підлягає маніпуляції (зміні). Ці види радіосигналів використовують для передачі повідомлень, представлених в дискретній формі.

Формування амплітудно-маніпульованих сигналів

Сигнали з АМн (позначають *ASK або SW,* вид випромінювання – *A1A*) використовуються для передачі повідомлень кодом Морзе (телеграфним ключем або електронним датчиком) при слуховому прийомі.

АМн відноситься до способу передачі дискретної інформації з пасивною паузою, тому його формування зводиться до запирання збуджувача при передачі «0» і відпирання – при передачі «1» (рис.2.21а, б).

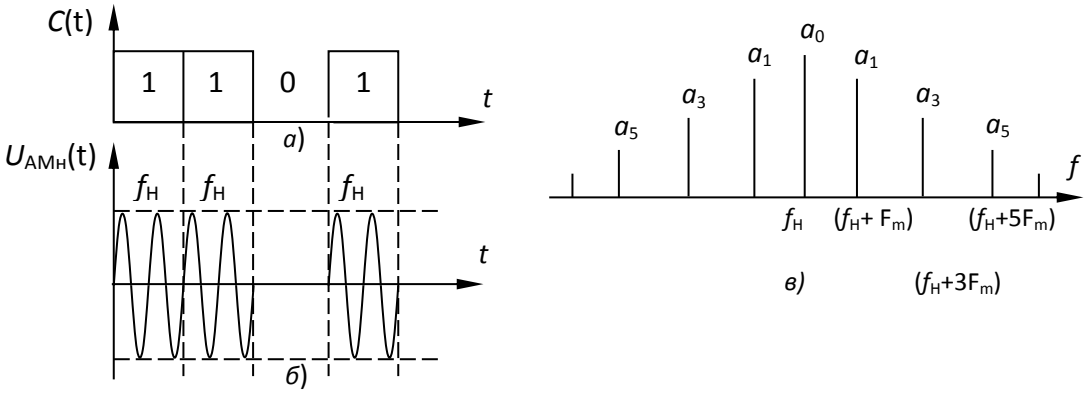


Рис. 2.21 – Первинний дискретний(а) та АМн(б)-сигнали та їх спектр(в)

Для формування сигналів *A1A* достатньо замикати і розмикати любе коло (від задаючого генератора до антени), яке приймає участь у формуванні несівного коливання (рис. 2.22).

Основна частина енергії АМн-сигналу сконцентрована в несівному коливанні та в найближчих до нього складових спектра – до III-ї або V-ї гармонік (рис. 2.21в). Цей факт враховується при формуванні сигналів А1А, а саме – його смуга обмежується за рахунок “округлення” імпульсів маніпуляції за допомогою ФНЧ. Завдяки цьому сигнал А1А на швидкостях передачі до 15…20 Бод є самими вузькосмуговим.

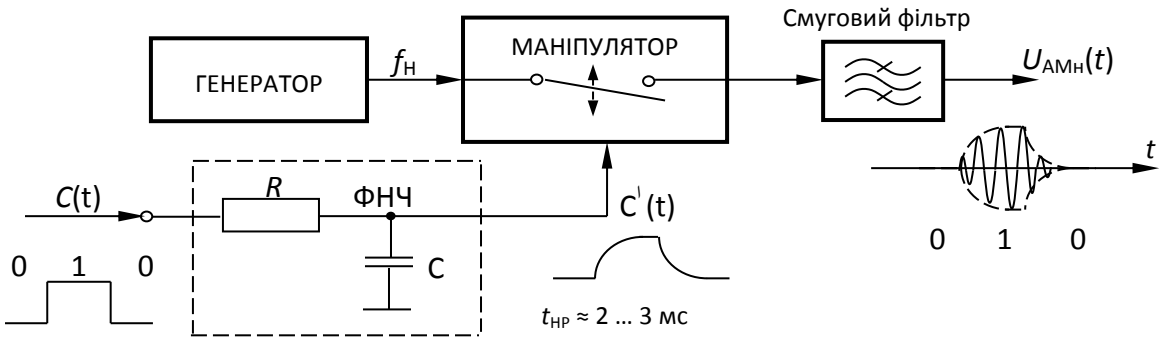


Рис. 2.22 – Спрощена структурна схема формування сигналів з АМн

Таким чином, при формуванні сигналів А1А необхідно:

– виключити проникнення коливань несівної частоти в антену при передачі інформаційного “0” (збуджувач запертий);

– забезпечити форму вихідного сигналу, який би мав мінімальну ширину спектра і добрий слуховий прийом.

Найбільш ефективно запирати змішувач в тракті переносу сигналу, або запирати каскади, які забезпечують підведення опорних коливань до змішувача.

Отже:

– в сучасних засобах радіозв’язку амплітудна маніпуляція (АТ– амплітудна телеграфія) використовується в якості допоміжного способу радіотелеграфування при ручній роботі (приклад: морський рухомий зв’язок) забезпечує високу вибірковість завдяки слуховому апарату оператора і дозволяє вести прийом при значному рівні завад;

– даний режим простий в технічній реалізації;

– спектр радіосигналу АТ займає вузьку смугу частот та залежить від швидкості телеграфування (наприклад, для реальних швидкостей телеграфування близько 20 Бод займана смуга складає: $\Delta F_{\text{АТ}}=(3\ldots5)\cdot B=(3\ldots5)\cdot 20=60\ldots100$ Гц, де B–швидкість телеграфування).

Формування частотно-маніпульованих сигналів

Сигнали з ЧМн (ЧТ – частотною телеграфією) використовуються для передачі цифрових (в т.ч. телеграфних) повідомлень.

При частотній маніпуляції по закону первинного електричного сигналу *C(t)* змінюється частота коливань струму в антені передавача, приймаючи два (при ЧТ) або чотири (при ДЧТ) дискретних значення, які відрізняються один від одного на деяку величину Δfзс – частоту зсуву(рознесення): $\Delta f_{\text{ЗС}}=|f_1 - f_0|$.

В разі одноканальної роботи (режим ЧТ) частота приймає одне з двох значень: f_0 при передачі «0» (безструмової посилки) або f_1 – при передачі «1» (струмової посилки).

Девіація частоти визначається наступним виразом:

$$\Delta f_{\text{дев.}}=\frac{\Delta f_{\text{ЗС}}}{2}.$$

Індекс частотної маніпуляції $m_{F1B}=\frac{\Delta f_{\text{ЗС}}}{2F_M}=\frac{\Delta f_{\text{дев}}}{F_M}$, де F_M – частота маніпуляції; B – швидкість телеграфування(в бітах або бодах).

Примітка: 1 Бод = 1 біт/с.

Щоб виключити міжсимвольну інтерференцію частота зсуву ($\Delta f_{ЗС}$) повинна бути більше половини швидкості телеграфування (в одиницях біт/с або Бод), тобто більше частоти маніпуляції (F_M).

Примітка: *мінімальна маніпуляція MSK* являє собою ЧМн, при якій частота зсуву ($\Delta f_{ЗС}$) дорівнює половині швидкості телеграфування, тобто дорівнює частоті маніпуляції F_M.

На практиці крім одноканальної частотної телеграфії – ЧТ (клас випромінювання – *F*1*B*) може використовуватися двоканальна частотна телеграфія – ДЧТ (клас випромінювання – *F*7*B*), яка відноситься до багаточастотної маніпуляції (*MFSK*).

Можна виділити два основних способи формування сигналів з ЧТ:

- без розриву фази;
- з розривом фази.

Формування ЧМн-сигналів без розриву фаз

У цьому випадку перехід з одної частоти на іншу здійснюється плавно за допомогою автогенератора (рис.2.23).

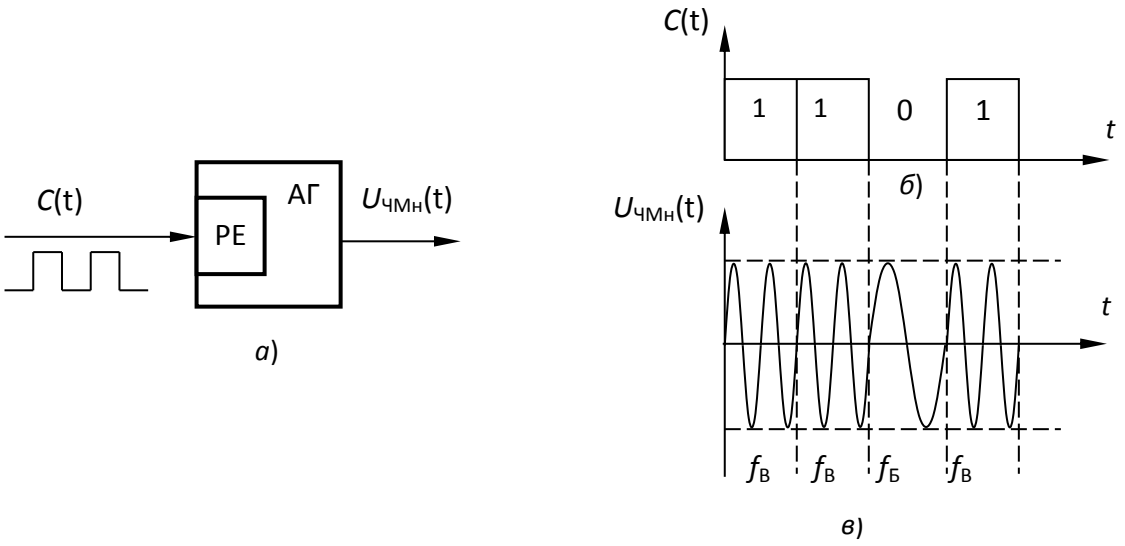


Рис. 2.23. *а* – Схема формування ЧМн сигналу без розриву фази;
б –первинний сигнал; *в* – ЧМн сигнал

В якості реактивного елементу (РЕ) автогенератора може використовуватися варикап.

Спектр такого сигналу нескінчений та аналогічний спектру сигналу з частотною модуляцією. Причому, чим більше індекс маніпуляції m_{F1B}, тим більше групуються складові спектру навколо частот $f_Б$ та $f_В$.

Основним недоліком даної схеми є низька стабільність вихідних коливань автогенератора, тому що він не може бути кварцовим.

Формування ЧМн-сигналів з розривом фази

Формувати сигнали частотної телеграфії (*F*1*B*) можливо шляхом переключення двох незалежних кварцових генераторів $Г_1$ і $Г_2$ (рис.2.24). Однак при цьому будуть мати місце скакання фази до 180^o в моменти комутації, що приводить до розширення спектру сигналу.

Цей недолік можливо частково зменшити, якщо формувати сигнали на достатньо високих частотах, а потім її поділити у дільнику частоти (ДЧ), що дозволяє зменшити розрив (скакання) фази до одиниць градусів.

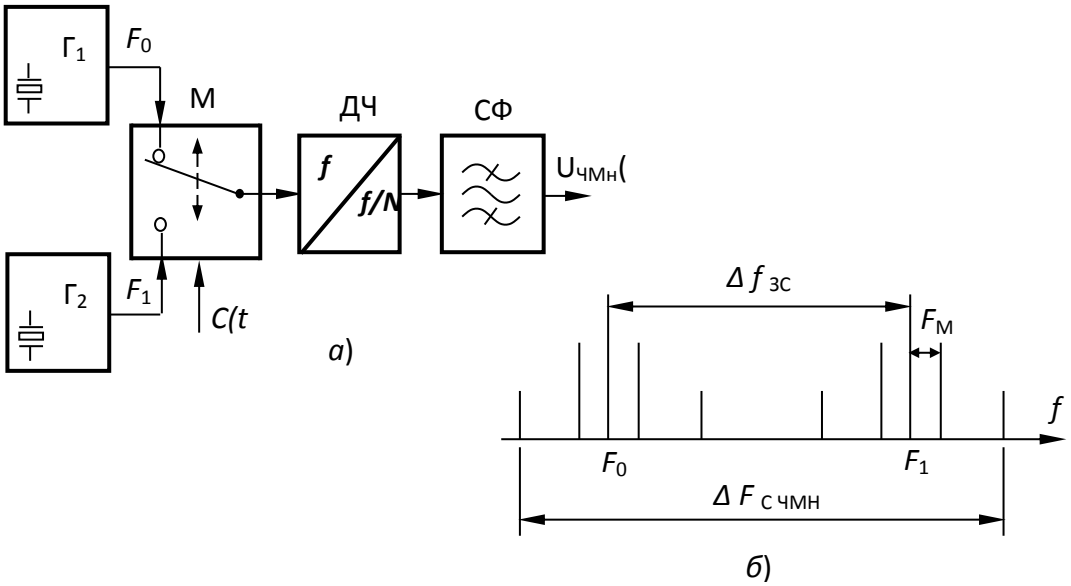


Рис. 2.24. *а* – Схема формування ЧМн-сигналу з розривом фази;
б – спектр ЧМн сигналу.

В цілях економічного використання спектру рекомендується здійснювати маніпуляцію округленими імпульсами і застосувати як можна менші зсуви частоти $\Delta f_{ЗС}$. Але робота при малих зсувах передбачає високу стабільність частот f_0 та f_1, тому на практиці використовують схеми формування з двома високо стабільними (як правило, кварцовими) автогенераторами. Прикладом такої реалізації може бути наступна схема (рис.2.25).

В цій схемі частоти F_0 та F_1 формуються як бічні складові спектра амплітудно-модульованого сигналу при модуляції коливань несівної частоти f_0 сигналом частоти $f_1 = \Delta f_{дев} = \Delta f_{ЗС}/2$. Причому моменти перемикання маніпулятора синхронізуються з частотою f_1, щоб комутація здійснювалася в моменти проходження сигналу генератора $АГ_1$ через 0.

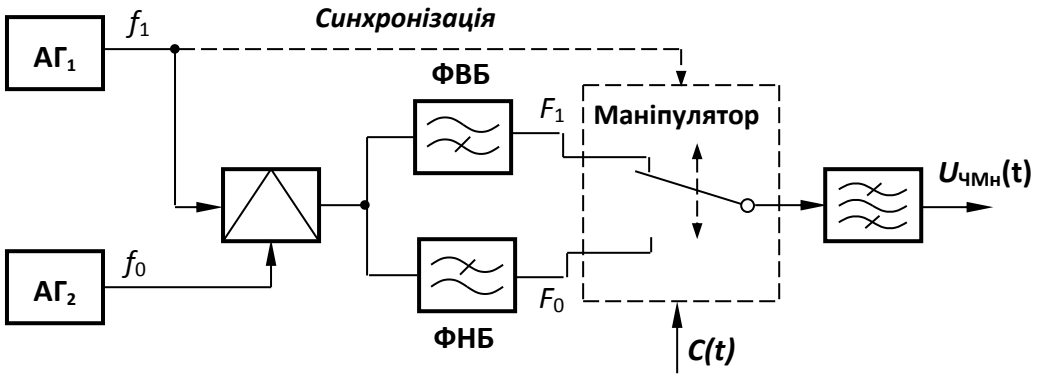


Рис. 2.25 – Приклад схеми формування ЧМн сигналів

В сучасних радіозасобах формування дискретних частот для відповідних комбінацій первинних телеграфних (цифрових) сигналів здійснюється на основі високо стабільного опорного кварцового генератора за допомогою дільників частоти і схеми управління (рис.2.26).

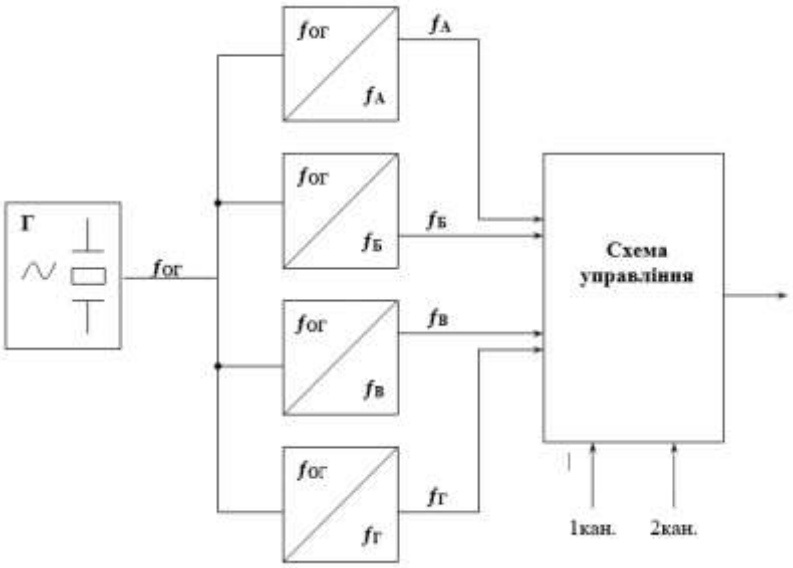


Рис. 2.26 – Приклад схеми формування ДЧТ-сигналів

Формування фазо-маніпульованих сигналів

Інформаційним параметром такого сигналу є поточна фаза ВЧ-коливання, яка змінюється стрибком за законом первинного сигналу $C(t)$. Практичне застосування знайшли сигнали з відносно-фазовою маніпуляцією (ВФМн), які ще мають назву фазо-різницевої маніпуляції, коли зміна фази коливання на π (180^o) відбувається лише при переході первинного сигналу C(t), наприклад, з «1» до «0», а при зворотному переході (з «0» до «1») фаза не змінюється.

Радіосигнали з фазовою маніпуляцією є вузько смуговими (спектр подібний амплітудно-маніпульованим сигналам але відсутня складова на несівній частоті) і має найкращу завадостійкість.

Проста реалізація фазового маніпулятора може бути виконана по принципу комутації фазообертувачів (рис.2.27), які забезпечують необхідні зсуви фази несівного коливання. При цьому для зменшення розширення спектру моменти комутації фази доцільно синхронізувати з несівним коливанням.

В цій схемі процес формування ВФМн-сигналу відбувається за наступним правилом: фаза ВЧ-сигналу змінюється на π (180^o) при кожному переході первинного сигналу C(t) з «1» на «0». Для цього додатково використовується пристрій, що перекодує, на основі логічного елементу «І-НІ» та лічильного тригера, які реалізують необхідний заданий алгоритм. Фільтри нижніх частот (ФНЧ) округляють форму імпульсів Q_1 і Q_2 для усунення розширення спектру сигналу.

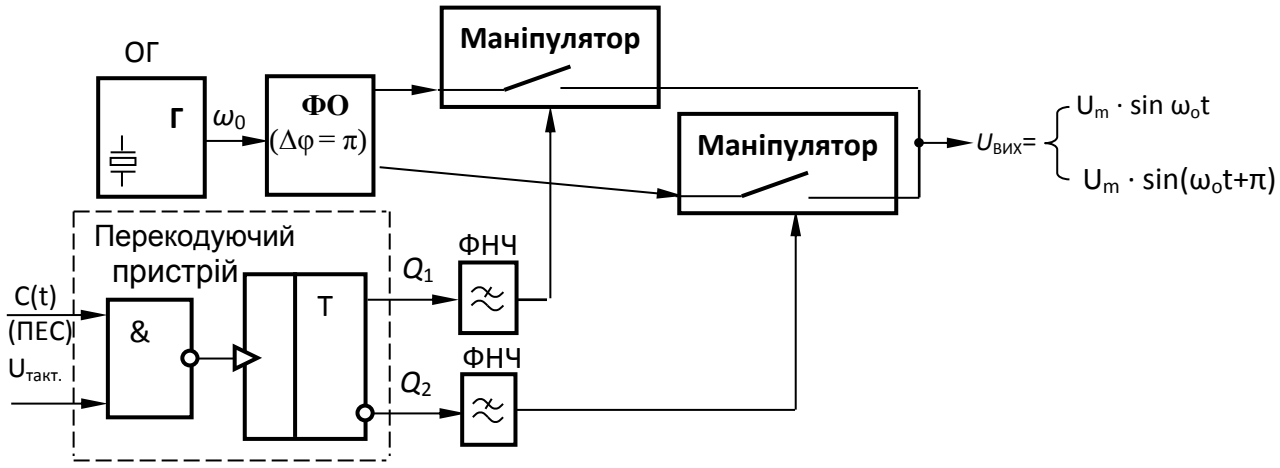


Рис. 2.27 – Схема формування ВФМн-сигналу

Формування безперервних радіосигналів

В аналогових системах радіозв'язку для передачі мовних (телефонних) повідомлень в діапазонах радіохвиль до 30 МГц використовують радіосигнали з амплітудною (АМ) та односмуговою (ОМ) модуляціями, а в діапазоні УКХ – частотну модуляцію (ЧМ).

Формування радіосигналів із односмуговою модуляцією

Перевагами односмугових сигналів (клас випромінювання *H3E, R3E, J3E*) є відносно вузька необхідна смуга частот та більш ефективне використання потужності передавача.

Основним методом формування радіосигналів ОМ є фільтровий метод, який передбачає лінійне перенесення первинного телефонного сигналу в область радіочастот за допомогою декілька несівних частот f_n (рис.2.28). Перенесення спектра за допомогою одного перетворення обмежується труднощами виділення нижньої або верхньої бічних смуг частот на виході балансного модулятора. Обирають для цього наступне співвідношення між сформованими в збуджувачі частотами: $f_1 > f_2 > f_3$, що збільшує відстань між нижньою та верхньою смугами та покращує можливість їх фільтрації (рис.2.29).

Частотне перетворення телефонного сигналу (ПЕС) в смузі F=(0,3…3,4) кГц призводить до появи як прямого (верхня бічна смуга) так і зворотного (інвертованого) (нижня бічна смуга) спектрів. В якості змішувача в схемі використовується балансний модулятор (БМ), в якому сигнал переноситься на частоту f_n (n=1, 2, 3…). На виході модулятора присутні лише бічні смуги сформованого сигналу, одна з яких при фільтровому методі виділяється за допомогою смугового фільтра (СФ).

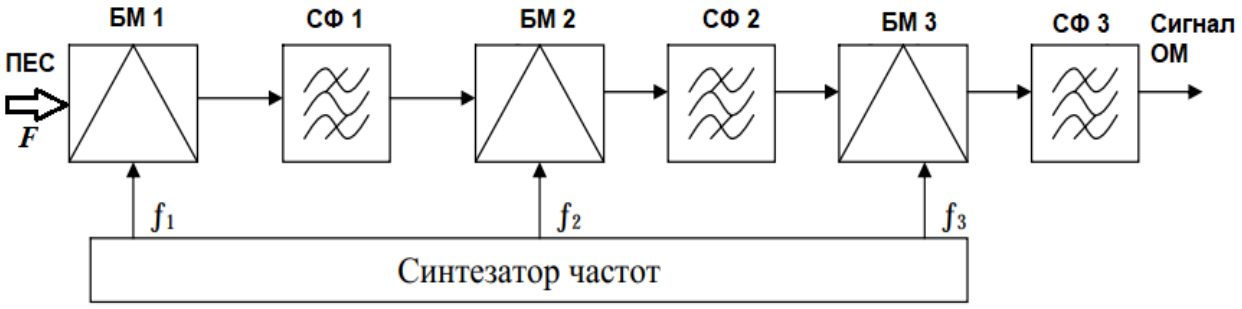


Рис. 2.28 – Схема формування сигналів з ОМ

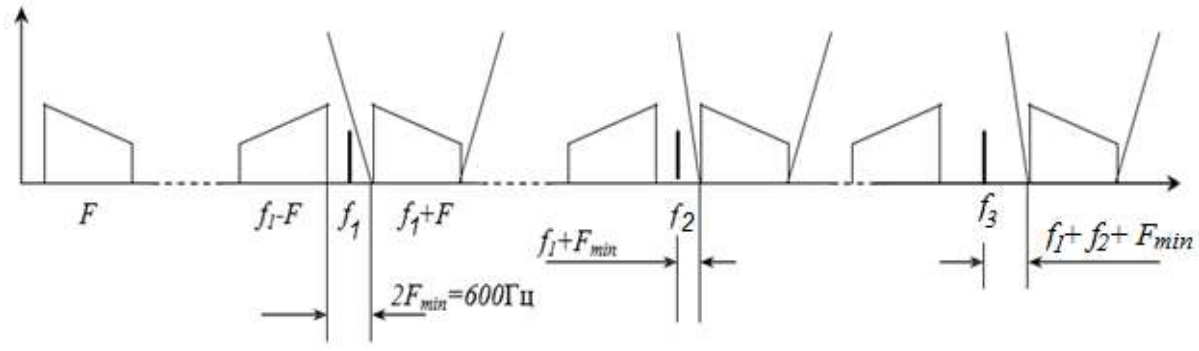


Рис. 2.29 – Процес лінійного перенесення сигналу з ОМ

До тракту формування сигналів з ОМ пред'являються наступні вимоги:

- висока ступінь придушення коливань несівних частот;
- висока стабільність несівних частот.

Для виконання вимоги до ослаблення (> 60 дБ) в смузі затримки смугового фільтра після першого перетворення крутизна спаду характеристики фільтру повинна бути (рис.2.30):

$$S = \frac{Д_{дБ}}{\Delta F_{Гц}} \geq \frac{60\ дБ}{600\ Гц} \geq 0{,}1\ дБ/Гц.$$

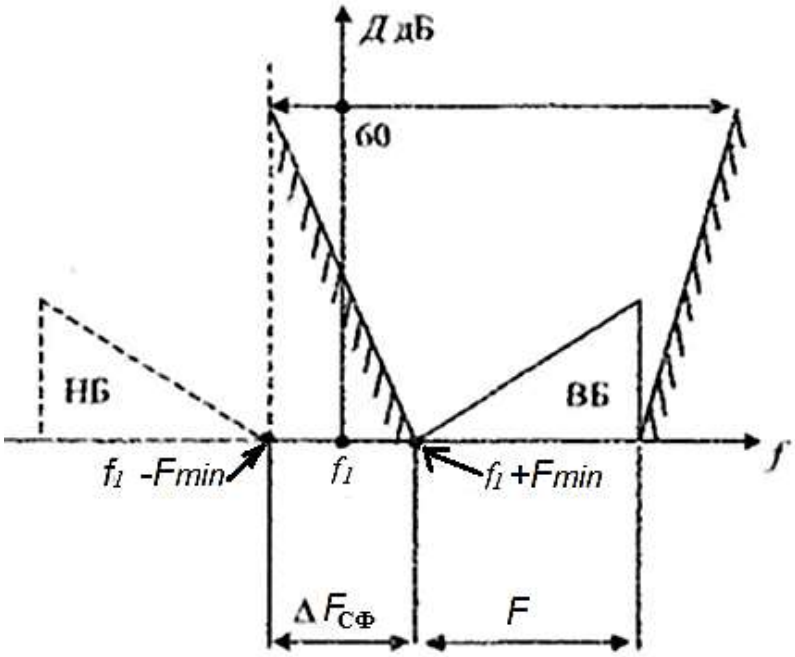


Рис. 2.30 – Фільтрація верхньої бічної смуги сигналу з ОМ

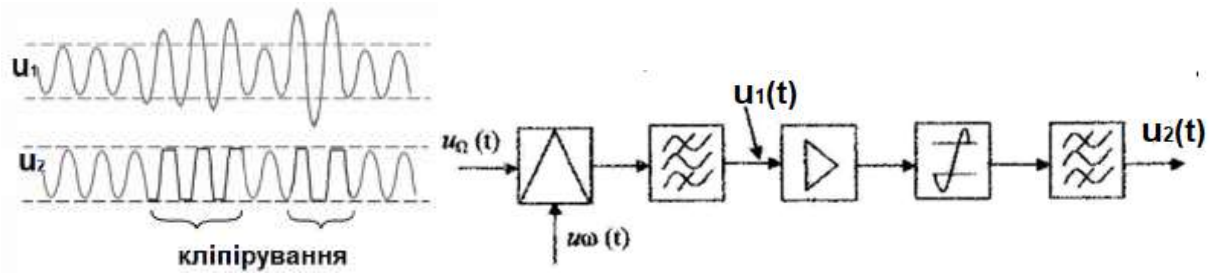
Для ефективного фільтрування частоту несівного коливання f_1 вибирають порівняно низькою (для багатьох радіосистем – 128 кГц) і після першого перетворення використовують кварцові фільтри, які задовольняють вимогам по крутизні характеристики.

В демодуляторі приймача сигналів з ОМ відбувається зворотне лінійне перенесення сигналу. Нестабільність частот (f_n) збуджувача передавача може викликати недопустимі спотворення сигналу на вході приймача, що називається *асинхронізмом*. Експериментально встановлені наступні норми до асинхронізму в радіолінії при передачі сигналів з ОМ:

- з високою якістю відтворення мовних повідомлень – <50 Гц;
- із задовільною розбірливістю – <250 Гц.

З метою підвищення ефективності використання потужності радіопередавача сформований сигнал ОМ обмежують по амплітуді, що

призводить до зниження його пікфактора – відношення максимального (пікового) значення напруги сигналу до його ефективного значення (рис. 2.31). Амплітудне обмеження сигналу ще називають *кліпіруванням*.



а) б)

Рис. 2.31 – Процедура (а) та схема (б) кліпірування сигналу з ОМ

Пікфактор мовного сигналу знаходиться в межах 3,6…4,2. Це призводить до того, що пікова потужність сигналу на виході передавача в 11…18 разів може перевищувати середнє(ефективне) значення, що є негативним фактором. Експериментально встановлено, що обмеження амплітуди на 12…15 дБ суттєво не впливає на розбірливість повідомлення, але значно покращує ефективність роботи підсилювача потужності передавача.

В схемах формування сигналів з ОМ передбачають можливість роботи з різними рівнями несівної та формування верхньої та/або нижньої бічної смуги.

Формування радіосигналів із частотною модуляцією

Радіосигнали з частотною модуляцією (випромінювання класу F3E) застосовуються в діапазоні УКХ, більш ефективно використовують потужність передавача (тому що постійна амплітуда) і дозволяють отримати виграш в завадостійкості прийому. По закону первинного сигналу в них змінюється миттєва частота коливань.

ЧМ-радіосигнал формується шляхом включення в контур автогенератора (АГ) реактивного елемента, наприклад варикапу ($C_д$), ємність якого змінюється відповідно до напруги первинного телефонного сигналу, яка прикладена до нього (рис. 2.32).

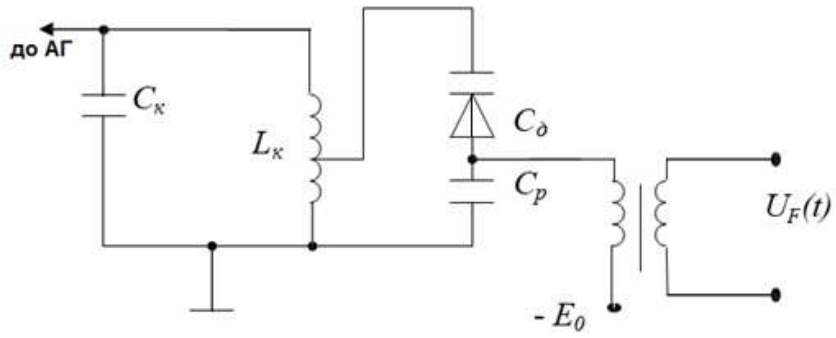


Рис. 2.32 – Формування сигналу з ЧМ

До ЧМ-модулятора пред'являються наступні основні вимоги:

– висока стабільність середньої (несівної) частоти модульованих коливань;

– постійність девіації частоти при роботі в діапазоні робочих частот ($f_{МІН}\ldots f_{МАКС}$) передавача (рис. 2.33а);

– лінійність модуляційної характеристики (рис. 2.33б);

– відсутність паразитної амплітудної модуляції;

– підйом характеристики залежності девіації частоти від частоти первинного сигналу (F) в області верхніх частот ($F_{МАКС}$), що забезпечується передспотворенням сигналу (рис. 2.33в).

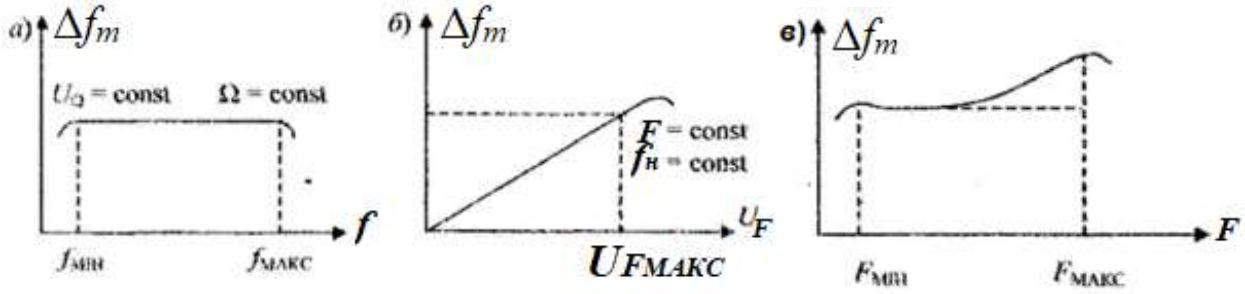


Рис. 2.33 – Вимоги до модулятора сигналів ОМ

При паралельному підключенні варикапу до коливального контуру АГ зі збільшенням робочої частоти девіація зростає (рис. 2.34а), при послідовному – зменшується (рис. 2.34б). Для забезпечення сталості девіації частоти у всьому діапазоні частот АГ включають в контур два варикапа (рис. 2.34*в*), один з яких – паралельно (V2) в коливальний контур, другий – послідовно (V1) (рис.2.34.*г*).

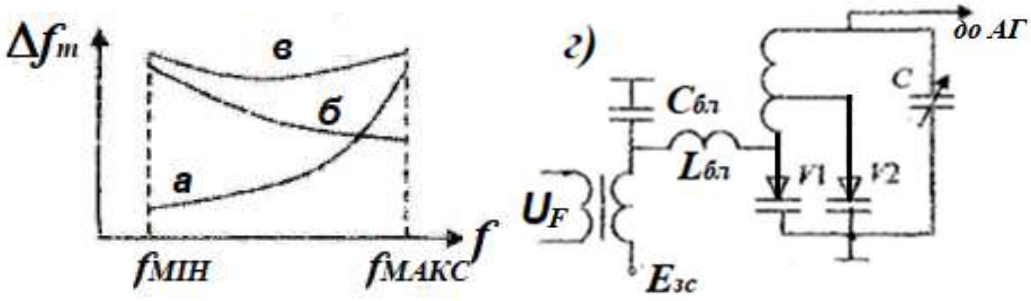


Рис. 2.34. Схема з комбінованим підключенням варикапів

Контрольні запитання

1. Як реалізується формування радіосигналів з АМн (АТ)?
2. Для чого виконують “округлення” імпульсів маніпуляції за допомогою ФНЧ?
3. Як реалізується формування радіосигналів з ЧМн (ЧТ) без розриву фази? Недоліки схеми.
4. Як реалізується формування радіосигналів з ЧМн(ЧТ) із розривом фази? Недоліки схеми. Яке призначення в схемі дільника частоти?
5. Поясніть принцип формування радіосигналів з відносно-фазовою маніпуляцією.
6. В чому сутність формування односмугових сигналів фільтровим способом?
7. Яке призначення кліпірування в схемі формування односмугових сигналів?
8. Які вимоги до модулятора радіосигналів із частотною модуляцією?
9. Навіщо в модуляторі ЧМ сигналу здійснюється передспотворення первинного телефонного сигналу?
10. Навіщо в схемах модуляторів ЧМ сигналів використовують комбіноване включення варикапів?

2.5. Підсилювачі потужності РАДІОПЕРЕДАВАЧІВ

Загальна характеристика підсилювачів потужності **(ПП)**

Тракт радіочастоти (ТРЧ) радіопередавача складається з наступних елементів:

- тракту підсилення;
- узгоджувального пристрою.

Тракт підсилення передавача призначений для підсилення сигналів, що сформовані в збуджувачі та складається з декількох каскадів:

– каскадів попереднього підсилення;

– вихідного каскаду підсилення.

Основні вимоги до ТРЧ:

– забезпечення заданої вихідної потужності передавача в робочому діапазоні частот;

– лінійність підсилення;

– забезпечення високого коефіцієнта корисної дії (ККД) всього тракту підсилення;

– забезпечення необхідного ступеня придушення побічних випромінювань;

– забезпечення мінімального часу перестройки з однієї частоти на іншу.

Підсилювач потужності *передавача називають генератором із зовнішнім збудженням (ГЗЗ), джерелом збудження якого є сигнал з виходу збуджувача передавача.* Частота вихідних коливань в ГЗЗ дорівнює (або є кратною при перемноженні частоти) частоті коливань на вході пристрою.

В передавачах ГЗЗ можуть виконувати різноманітні функції:

– підсилювати радіосигнал (підсилювач);

– збільшувати частоту в ціле число разів (перемножувач частоти);

– змінювати амплітуду радіосигналу по закону первинного низькочастотного сигналу (амплітудний модулятор).

Узагальнена структурна схема ГЗЗ (підсилювача потужності) складається з наступних елементів (рис. 2.35):

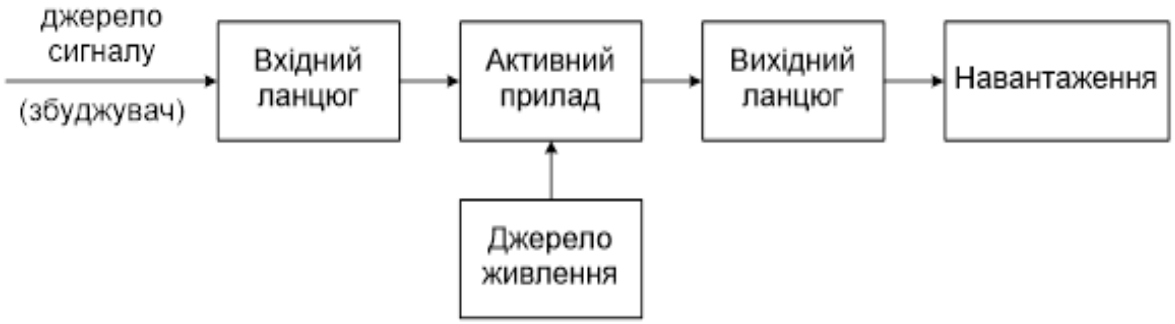


Рис.2.35 – Структурна схема ГЗЗ

В якості активного (підсилювального) елементу в підсилювачах використовують: тріоди, тетроди, пентоди, лампи біжучої хвилі (ЛБХ), прольотні клістрони, магнетрони, біполярні та польові транзистори.

Передавачі діапазонів КХ і УКХ (частотних піддіапазонів №№ 7…9) в залежності від необхідної вихідної потужності використовують *лампові* та *транзисторні* ГЗЗ. Лампові ГЗЗ застосовуються в потужних каскадах передавачів середньої та великої потужності.

Вихідний ланцюг підсилювача виконує дві важливі функції:

– узгоджує навантаження каскаду підсилення (Zн) з вихідним опором активного елементу підсилювача для формування максимальної вихідної потужності;

– придушує побічні коливання.

Лінійність підсилення та ККД підсилювача залежить від положення робочої точки на прохідній характеристиці, амплітуди вхідного сигналу та опору навантаження. Існує оптимальне значення опору навантаження підсилювача $R_{П_оптим}=R_{ГР}$, при якому забезпечується максимальна потужність на виході підсилювача.

Вимоги лінійності підсилення знаходяться в протиріччі з вимогами підвищення ККД підсилювача.

Придушення побічних коливань, простота та швидкість перебудови підсилювача визначається вихідним ланцюгом. З цієї точки зору найбільш оптимальними є застосування ланцюгів, що працюють в широкому діапазоні частот і не вимагають перебудови, а також широкосмугових підсилювальних елементів.

В якості прикладу розглянемо схему лампового підсилювача на тетроді (рис.2.36).

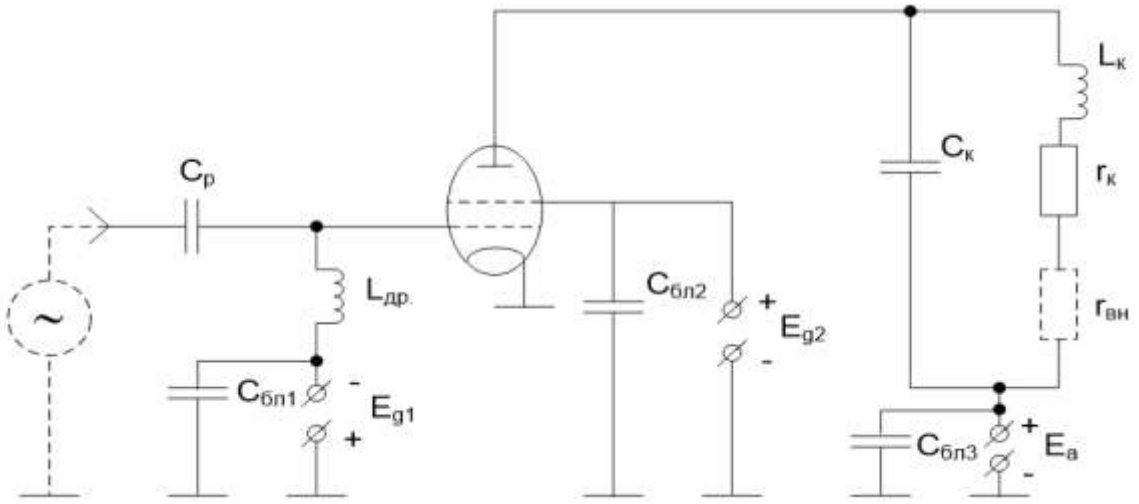


Рис.2.36 – Схема лампового підсилювача на тетроді

Елементи $C_р$, $L_{gр}$, $C_{бл1}$ складають вхідний ланцюг. Напруга зміщення E_{g1} визначає положення робочої точки на характеристиці лампи. Активним прикладом є тетрод, до якого подається анодна напруга E_a від джерела живлення. Вихідним ланцюгом є коливальний контур $L_к$, $C_к$, $r_к$, (величина $r_к$ враховує втрати енергії в контурі) Навантаженням тетроду є "внесений" опір $r_{вн}$, який підключається до контуру та характеризує ту частину коливальної енергії, що віддається генератором в наступні кола (наприклад, в антену).

Енергетичні співвідношення у підсилювачах потужності.

Потужність, яка споживається від джерела анодного живлення (E_a) визначається наступним виразом:

$$P_0 = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} E_a \cdot i_a(\omega t)dt = E_a \cdot I_{a0}\,.$$

Коливальна потужність першої гармоніки, яка генерується лампою дорівнює:

$$P_{\sim} = \frac{1}{2}U_m \cdot I_{a1}\cos\varphi\,,$$

де φ – зсув фази між першою гармонікою анодного струму і напругою на контурі.

При точному налаштуванні коливального контуру в резонанс із напругою збудження (φ = 0°, а $\cos\varphi$ = 1) маємо наступний вираз для коливальної потужності:

$$P_{\sim} = \frac{1}{2}U_m \cdot I_{a1}.$$

Потужність втрат, яка виділяється на аноді лампи у вигляді тепла дорівнює:

$$P_a = P_0 - P_{\sim}\,.$$

ККД анодного кола визначається по наступній формулі:

$$\eta_a = \frac{P_{\sim}}{P_0} = \frac{1}{2}\cdot\frac{U_m}{E_a}\cdot\frac{I_{a1}}{I_{a0}} = \frac{1}{2}\xi\cdot\frac{I_{a1}}{I_{a0}}\,,$$

де $\xi = \frac{U_m}{E_a}$ – коефіцієнт використання анодної напруги.

Корисна потужність ($P_{кор.}$), яка виділяється на опорі $r_{вн}$, складає лише частину коливальної потужності ($P_{\sim}$). Інша частина потужності($P_к$) виділяється у вигляді тепла на опорі $r_к$. Таким чином:

$$P_{\sim} = P_{кор.} + P_{к} = \frac{1}{2} I_{к}^{2} \cdot \left(r_{вн.} + r_{к} \right)$$

ККД анодного контуру:

$$\eta_{к} = \frac{P_{кор.}}{P_{\sim}} = \frac{r_{вн.}}{\left(r_{вн.} + r_{к} \right)} = \frac{1}{1 + \frac{r_{к}}{r_{вн.}}} .$$

Для збільшення значення $\eta_{к}$ потрібно зменшувати $r_{к}$ (використовувати високо добротні елементи коливального контуру) і збільшувати $r_{вн.}$.

Загальний ККД підсилювача потужності *визначається відношенням потужності, яка виділяється у корисному навантаженні, до потужності, що споживається від джерела постійного струму*:

$$\eta_{ПП} = \frac{P_{кор.}}{P_{0}} = \frac{P_{\sim} \cdot \eta_{к}}{P_{0}} = \eta_{a} \cdot \eta_{к} = \frac{1}{2} \cdot \xi \cdot \frac{I_{a1}}{I_{a0}} \cdot \eta_{к} \cdot 100\% .$$

Практичні висновки з формули для збільшення коефіцієнта корисної дії підсилювача потужності:

1. Зменшити потужність, яка розсіюється на аноді у вигляді тепла P_{a} (тобто, зменшити I_{a0}) - для цього робоча точка активного приладу вибирається на початку анодно-сіткової характеристики шляхом збільшення напруги зсуву E_{g1}.
2. Збільшити коефіцієнт використання анодної напруги ξ шляхом збільшення амплітуди напруги збудження.
3. Збільшити $\eta_{к}$, тобто, зменшити втрати у коливальному контурі.

Якщо робоча точка тетрода у розглянутій схемі вибирається на середині лінійної ділянки анодно-сіткової характеристики (режим класу *A*), то:

$$\xi = 0{,}7 \div 0{,}8 \ ; \quad \eta_{к} = 0{,}7 \div 0{,}8 \ ; \quad \frac{I_{a1}}{I_{a0}} = 0{,}7 \div 0{,}8 \Rightarrow \eta_{ПП} = (20...30)\% .$$

Режими роботи підсилювачів потужності.

Від режимів роботи активного приладу залежить коефіцієнт корисної дії підсилювача потужності і форма вихідного сигналу. Режим роботи (рис. 2.37) в свою чергу визначається:

– наявністю чи відсутністю вхідного сигналу – сигналу збудження;

– положенням робочої точки на прохідній характеристиці, яке залежить від напруги зсуву вхідного електроду активного елементу (див. рис. 2.38);

– співвідношенням напруги зсуву та амплітуди сигналу збудження.

При відсутності сигналу на вході ГЗЗ на всіх електродах діють тільки постійні напруги (наприклад: E_{g0}, E_{a0}, I_{a0}), які визначають положення робочої точки в *статичному режимі*.

Динамічний режим роботи підсилювача (ГЗЗ) має місце при дії на його вході сигналу збудження – тобто сигналу, який необхідно підсилити.

В різних режимах роботи (*A, AB, B, C*) анодний струм (I_a) буде протікати в вихідному ланцюгу тільки в певний період часу, що характеризується кутом відсічки (ψ) анодного струму.

Кут відсічки ψ *дорівнює половині довжини імпульсу анодного струму (по основі), що визначений в кутовій мірі за час одного періоду дії вхідного сигналу – напруги збудження.*

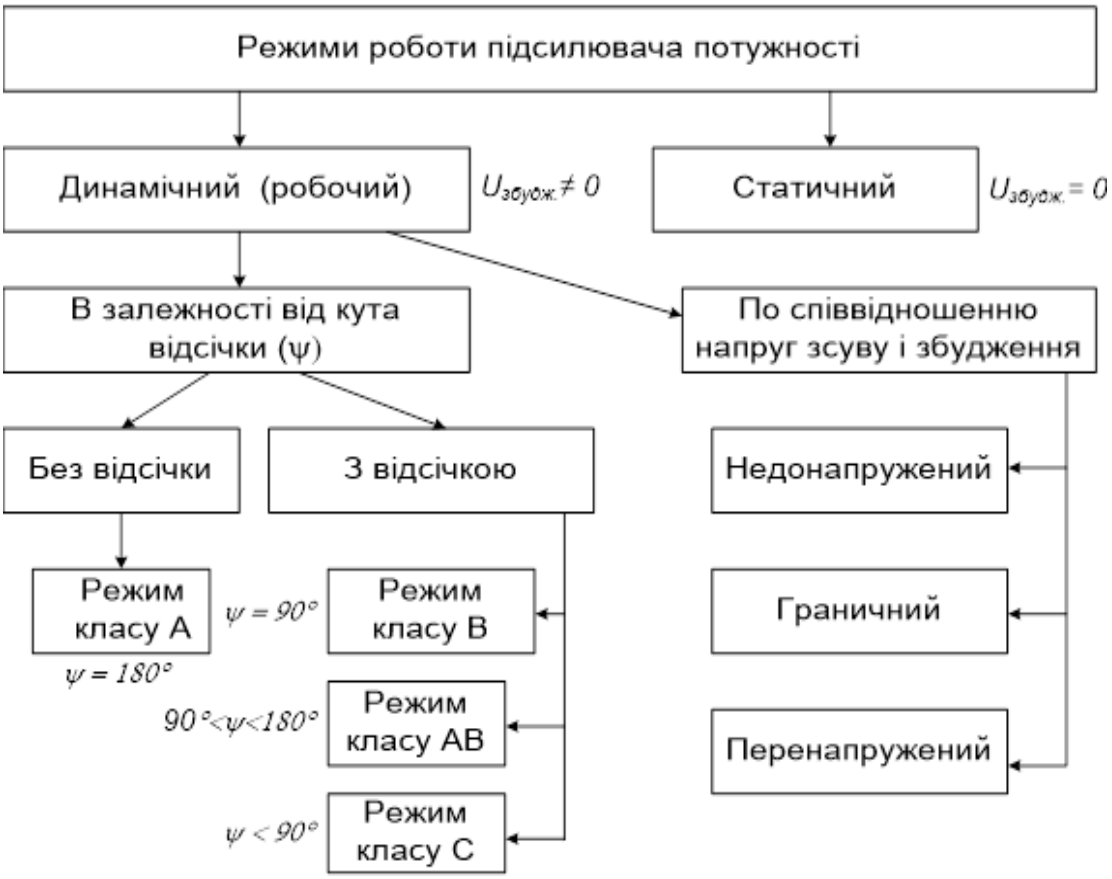


Рис.2.37 – Режими роботи підсилювача

Встановлення необхідного положення робочої точки підсилювача при номінальних напругах на всіх електродах здійснюється шляхом зміни постійної напруги (напруги зсуву) на вхідному електроді підсилювального елемента.

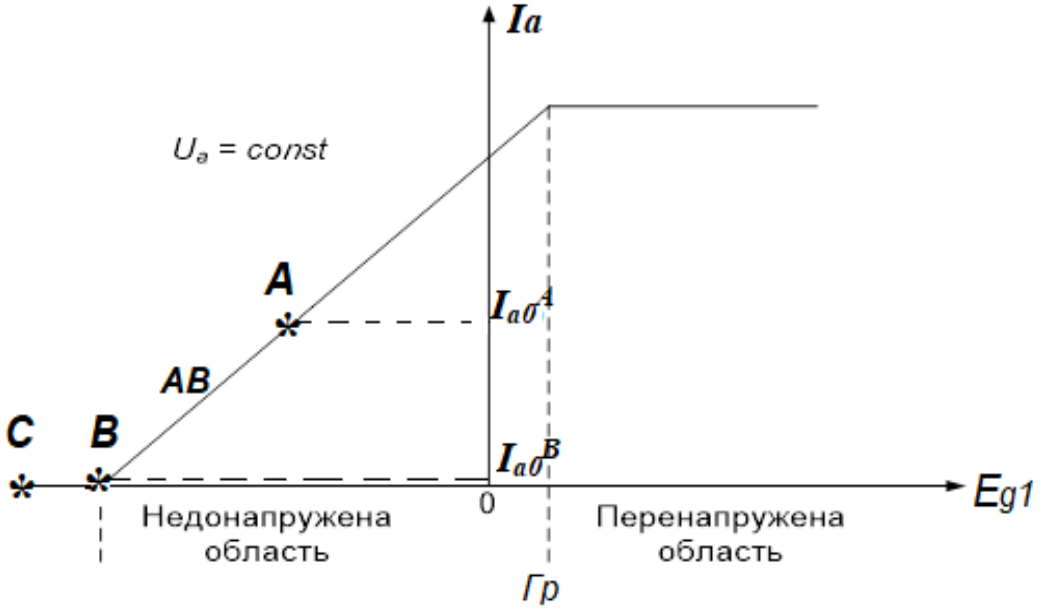


Рис. 2.38 – Анодно-сіткова характеристика тетроду

Для режиму класу ***A*** (рис.2.39) необхідно напругою зсуву забезпечити положення робочої точки *на середині лінійної ділянки прохідної характеристики* (анодно-сіткової для тріоду).

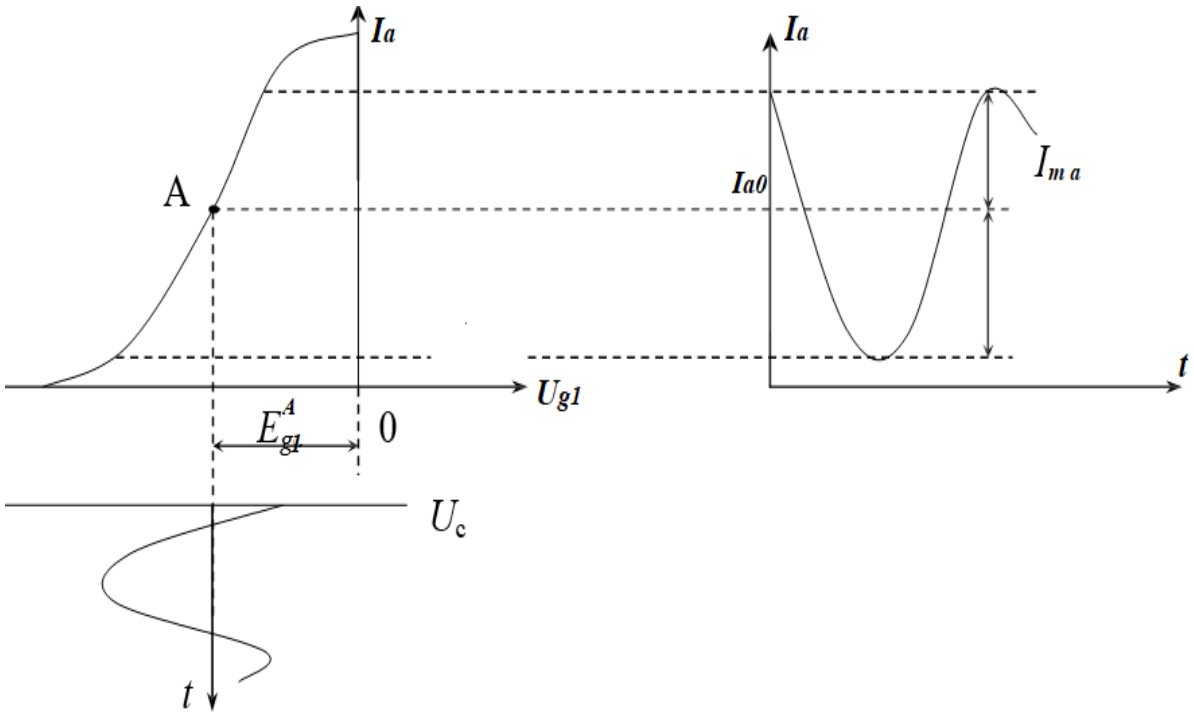


Рис. 2.39 – Режим класу А

Такий режим ще має назву *режиму першого роду.* Він використовується в каскадах попереднього підсилення, є найбільш невигідним з точки зору енергетичних показників (велика P_a, тому що великий струм I_{a0}), але при цьому є лінійним, тобто анодний струм змінюється по гармонійному закону та повністю повторює форму вхідного сигналу без спотворень.

При роботі підсилювального елемента підсилювача в режимі класу ***A*** забезпечується лінійність підсилення за умови, що амплітуда вхідного сигналу не виходить за межі лінійної ділянки характеристики.

Режими з відсічкою анодного струму отримали назву *режими другого роду*.

В режимі класу ***B*** робоча точка знаходиться на початку (на нижньому згині) прохідної характеристики (рис.2.38). При роботі активного елемента підсилювача в режимі *B* (рис.2.40) підсилюються тільки позитивні напівперіоди вхідних коливань, а негативні – відсікаються (робота з відсічкою вихідного струму при $\psi=90^0$), тому струм на виході підсилювача має форму імпульсів тривалістю, що дорівнює напівперіоду вхідного коливання ($T_{вх}/2$).

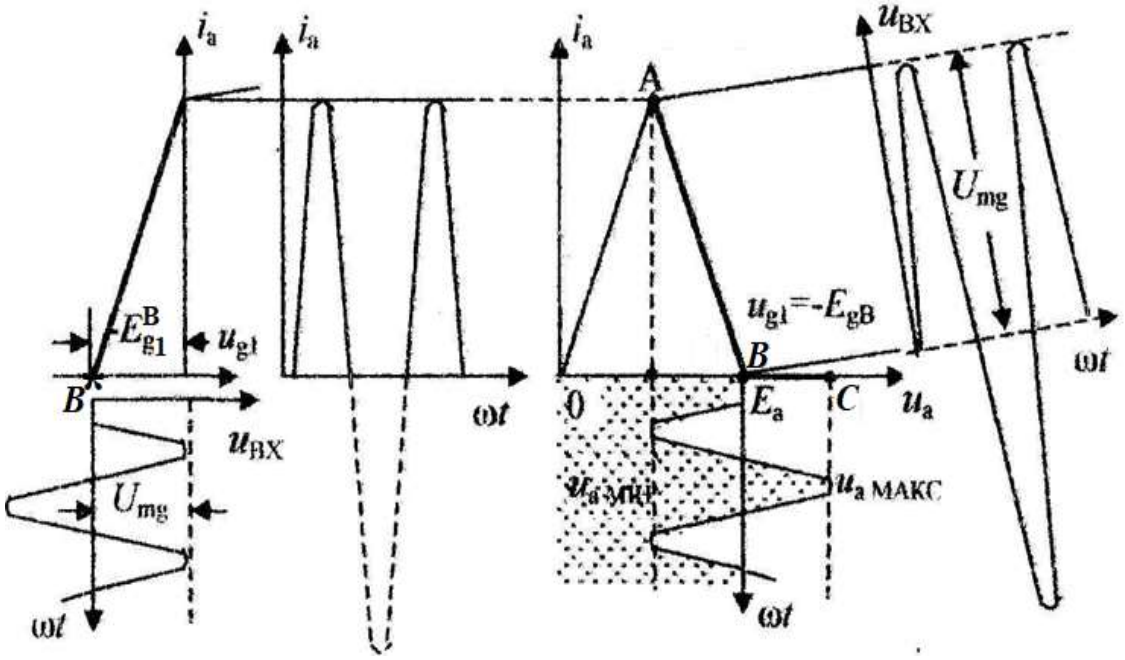


Рис.2.40 – Режим класу В

При цьому імпульс анодного струму має максимальну величину. Постійна складова вихідного струму в режимі ***B*** значно менша, ніж у режимі класу *A*, тому ККД підсилювача більший ніж в режимі класу *A*, що визначає доцільність його застосовування в потужних каскадах тракту підсилення,

коли необхідно забезпечити лінійність підсилення при можливо більшому ККД (наприклад, для сигналів з амплітудною та односмуговою модуляцією).

Режим класу ***AB*** реалізується при куті відсічки вихідного струму $90^0 < \psi < 180^0$. Цей режим в каскадах підсилення потужності практично не застосовується, тому що не забезпечує лінійність посилення та має низький ККД.

Режим класу ***C*** (при куті відсічки $\psi < 90^0$) є ефективним для підсилення радіосигналів, амплітуда коливань яких не змінюється в часі (наприклад, сигналів з частотною модуляцією та частотною і фазовою маніпуляціями).

В залежності від співвідношення напруг зсуву та збудження розрізняють три види динамічного режиму роботи підсилювача: недонапружений, граничний та перенапружений (рис. 2.38).

В *недонапруженому режимі* ($U_{m вх} < |E_{g1}|$) анодний струм має характерну залежність від напруги збудження (так в режимі класу *A* струм анода повністю повторює форму вхідного сигналу), великі теплові втрати на вихідному електроді та, відповідно, низький ККД.

В *граничному режимі* ($U_{m вх} \approx |E_{g1}|$) імпульс анодного струму злегка обмежений по амплітуді, забезпечується високий коефіцієнт використання напруги живлення і відповідно – високий ККД, тобто підсилювач віддає максимальну потужність в навантаження $R_н$, яке прийнято позначати $\boldsymbol{R_{гр}}$.

В *перенапруженому режимі* ($U_{m вх} > |E_{g1}|$) імпульс анодного струму має провал у вершині внаслідок збільшення сіткових струмів, має місце практично сталість амплітуди вихідної напруги, яка не залежить від напруги збудження та опору навантаження.

Важливою характеристикою підсилювача потужності є ***динамічна характеристика***, яка представляє собою *геометричне місце точок, нанесених на сімействі статистичних характеристик підсилювального елемента, кожна з яких відображає співвідношення між струмами та напругами в кожен момент часу протягом періоду (T) дії вхідного сигналу*. В динамічному режимі (при подачі вхідного сигналу) робоча точка буде змінювати своє положення, переміщаючись по ламаній лінії *ABC* (для режиму класу В рис. 2.40), яка і є *динамічною характеристикою підсилювача*. Нахил ділянки *AB* до осі абсцис (U_a) залежить від напруги живлення (E_a), яка, як правило, є постійною та опору навантаження підсилювача потужності ($R_н$): чим більше $R_н$, тим менше кут нахилу.

При зміні опору навантаження підсилювача ($R_н$) та/або напруги живлення (E_a) змінюється нахил динамічної характеристики та амплітуда вихідної напруги (рис. 2.41 та 2.42).

Оптимальним положенням верхньої точки (*А* на рис.2.41) динамічної характеристики є місце перегину верхньої статичної характеристики активного елемента $I_a=f(U_a)$ *при* $U_{g1}=U_{g1max}$. В цій точці відбувається перехід у граничний режим, який характеризується плоскою вершиною імпульсу вихідного струму, а отже і максимальною потужністю, що віддається в навантаження $R_н$. Таке положення динамічної характеристики забезпечується відповідними значеннями номінальної напруги живлення ($E_а$) та опором навантаження $R_н$, яке прийнято позначати як *граничний опір* (**$R_{гр}$**). В граничному режимі високі коефіцієнт використання напруги джерела живлення та ККД. Залежність основних параметрів підсилювача від еквівалентного опору навантаження зображено на рис. 2.43.

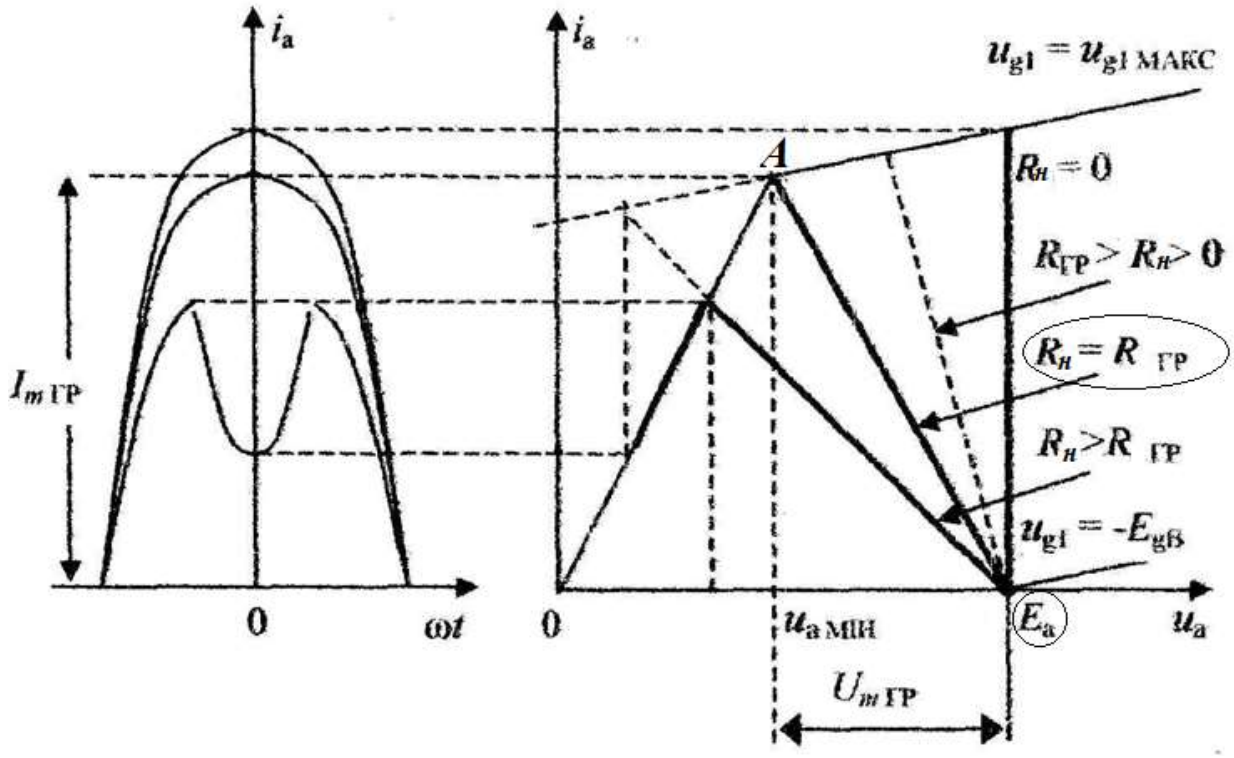


Рис. 2.41 – Динамічні характеристики та форма імпульсу вихідного струму при різних опорах навантаження

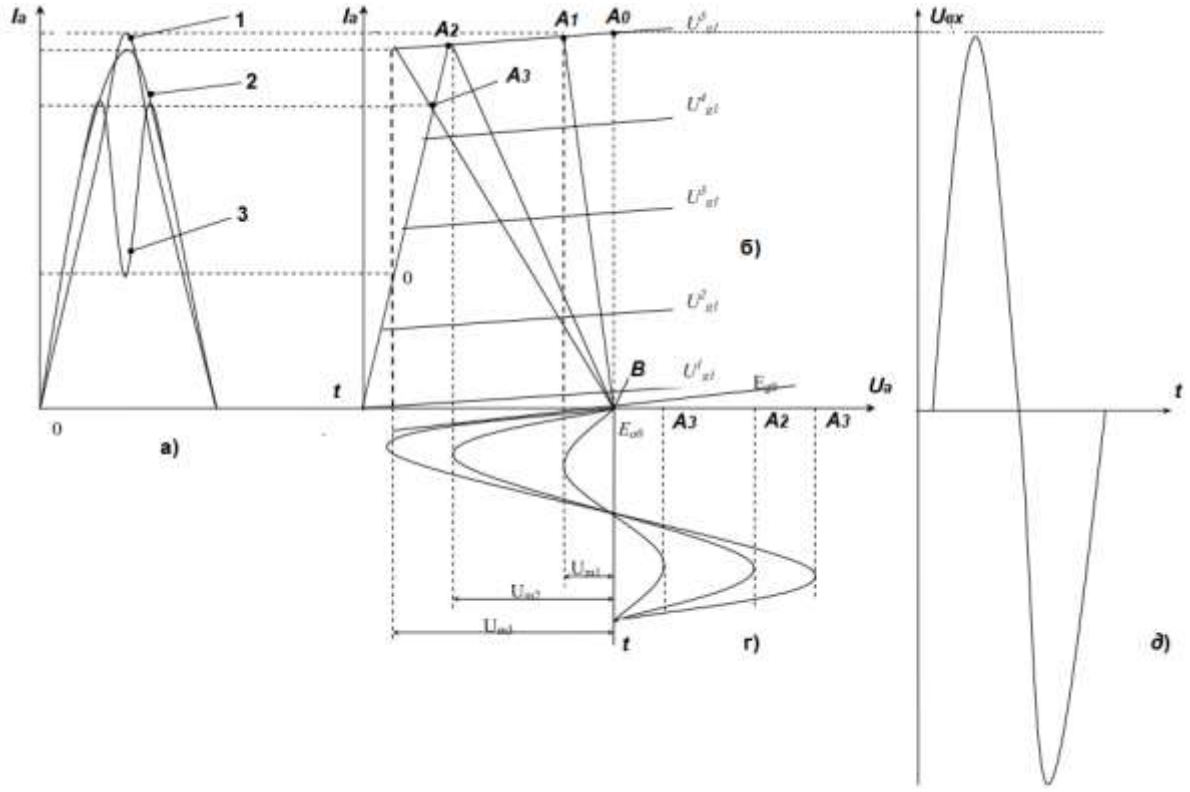


Рис. 2.42 – Вхідний сигнал $\boldsymbol{U_{вх}}$ (*д*), форма імпульсу анодного струму $\boldsymbol{I_a}$ (а), положення навантажувальної характеристики $\boldsymbol{A_nB_n}$ (б) та вихідна напруга на аноді $\boldsymbol{U_a}$ (г) для різних значень опору навантаження

(n=0 при $R_н$=0; n=1 при $R_н$<$R_{гр}$; **n=2 при $\boldsymbol{R_н}$=$\boldsymbol{R_{гр}}$**; n=3 при $R_н$>$R_{гр}$)

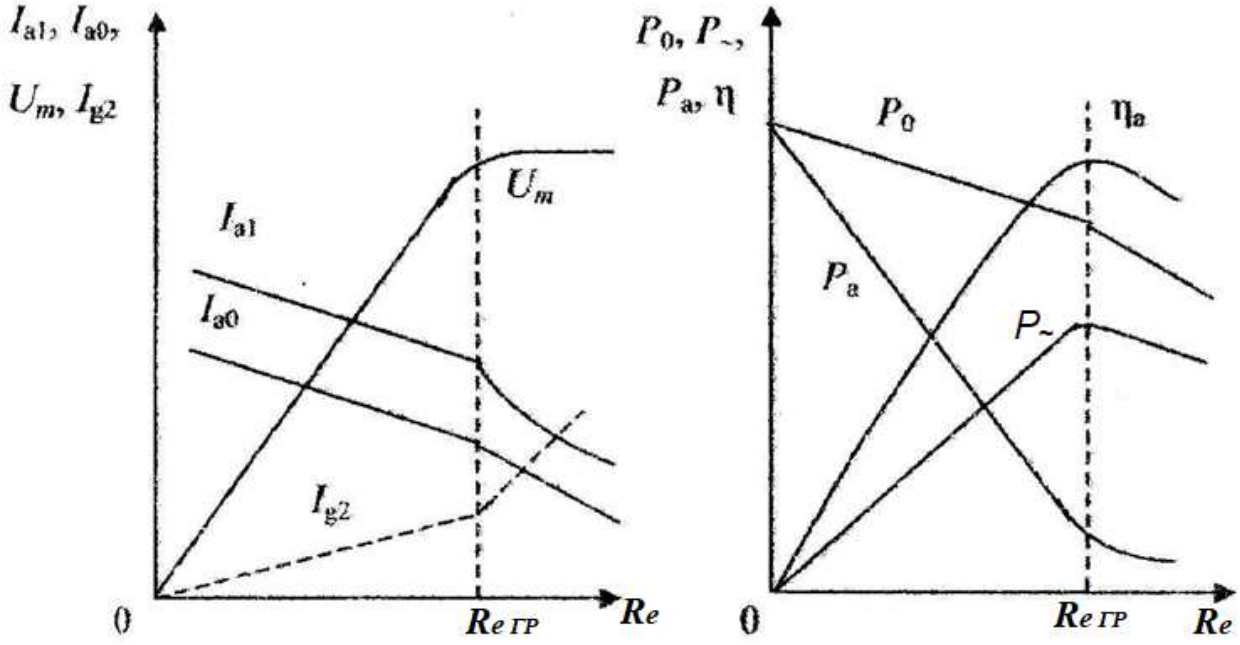


Рис. 2.43 – Залежність параметрів підсилювача від еквівалентного опору навантаження

Висновки:

1. Для забезпечення лінійності підсилення (для радіосигналів з амплітудною та односмуговою модуляціями) з максимальними вихідною потужністю та ККД активний (підсилювальний) елемент підсилювача потужності повинен працювати:
   - в режимі класу *B*;
   - в граничному або слабо недонапруженому режимі (при кутах відсічки близьких до 90°), що забезпечується сталим опором навантаження та сталою амплітудою вхідного сигналу;
   - з опором навантаження, що дорівнює «граничному» ($Z_н=R_{гр}$).
2. В каскадах попереднього підсилення таких радіосигналів (п.1) для забезпечення максимальної лінійності підсилення можуть застосовувати режим класу *A*.
3. Для підсилення радіосигналів, в яких амплітуда не змінюється в часі (частотна та фазова модуляції/маніпуляції) та для сигналів з амплітудною маніпуляцією із міркувань забезпечення максимального ККД використовують злегка перенапружений режим класу *C* із кутами відсічки $70^0…80^0$.

Особливості та режими роботи каскадів попереднього підсилення.

Каскади попереднього підсилення передавача призначені для забезпечення потужності, необхідної для збудження вихідного каскаду. До них пред'являються наступні вимоги:

- постійність амплітуди вихідної напруги в діапазоні робочих частот;
- лінійність підсилення (особливо для сигналів з амплітудною та односмуговою модуляцією).

Перша вимога забезпечується:

- роботою каскаду в слабо перенапруженому режимі (для радіосигналів *F1B, G1B, A1A*…);
- роботою в межах недонапруженого режиму з постійним опором навантаження (для сигналів з амплітудною та односмуговою модуляціями);
- застосуванням системи автоматичного регулювання підсилення (АРП) тощо.

Резонансні підсилювачі потужності на транзисторах.

При використанні транзисторних схем підсилювачів у передавачах необхідно враховувати наступні особливості:

– залежність параметрів транзисторів від режиму роботи та частоти;

– низькі вхідні (частини та одиниці Ом) та вихідні (одиниці та десятки Ом) опори транзисторів;

– критичність транзисторів до перевантаження по напрузі та струму;

– залежність параметрів транзисторів від температури.

В підсилювачах на біполярних транзисторах використовують дві схеми включення:

– з загальним емітером (ЗЕ) – в передавачах декаметрового та частково метрового діапазонів;

– з загальною базою (ЗБ) – в передавачах метрового діапазону.

Схема з ЗЕ забезпечує більший коефіцієнт підсилення та добре узгодження з іншими каскадами, а схема з ЗБ характеризується меншою залежністю параметрів від температури.

Широкосмугові підсилювачі потужності.

В сучасних радіосистемах отримали широке застосування широкосмугові сигнали, що потребує використання широкосмугових підсилювачів, які забезпечують перекриття деякого діапазону частот без їх додаткового налаштування. Це значно покращує процес автоматизації та швидкість зміни частот передавача.

Основне обмеження на смугу підсилення накладають паразитні параметри активних елементів (ламп та транзисторів) підсилювачів:

– вхідні та вихідні ємності радіоламп;

– індуктивність електродів транзисторів.

Для корекції частотної характеристики та розширення смуги підсилення в транзисторних підсилювачах використовують вхідні корегуючі ланцюги (додатковий резистор – в схемах з ЗБ, корегуючи ємність – в схемах з ЗЕ).

В якості широкосмугових використовують різні типи лампових і транзисторних підсилювачів:

– резисторні з елементами корекції;

– резонансні зі зниженою добротністю контурів;

– підсилювачі на фільтрах, що комутуються;

– підсилювачі з розподіленим підсиленням тощо.

Особливості вихідних каскадів.

Вихідним каскадом передавача називають його останній каскад, що забезпечує задану вихідну коливальну потужність в антені. Необхідна потужність передавача в багатьох випадках не може бути забезпечена однією

лампою або транзистором у вихідному каскаді тракту підсилення. Для підвищення потужності ГЗЗ (підсилювача):

– включають декілька активних елементів (ламп або транзисторів) паралельно;

– використовують двотактні схеми включення активних елементів;

– застосовують схеми додавання потужностей тощо.

Перші два методи мають ряд недоліків, серед яких:

– відмова одного з підсилювального приладу може викликати вихід із ладу інших приладів;

– низька стійкість до паразитних генерацій через збільшення числа паразитних реактивностей та ускладнення схеми;

– нерівномірність розподілу струмів підсилювальних приладів через розкид їх параметрів посилюється зв'язком через загальне навантаження.

Все це призводить до різкого зниження надійності передавача в цілому. Тому отримання великої потужності в передавачах досягається шляхом додавання (підсумовування) потужностей окремих порівняно малопотужних ГЗЗ.

Розрізняють три методи додавання потужностей:

– додавання потужностей декількох блоків в загальному контурі – вихідний каскад передавача реалізується у вигляді декількох однотипних блоків, що підключаються паралельно або послідовно, збудження яких відбувається синфазно від одного загального збуджувача;

– додавання високочастотних полів у просторі – використовують в тих випадках, коли потрібно збільшити напруженість електромагнітного поля, що створюється антеною передавача в заданому напрямку;

– додавання потужностей за допомогою мостових схем.

В загальному випадку *мостовий пристрій – це багатополюсник, за допомогою якого забезпечується спільна взаємонезалежна робота декількох окремих генераторів радіочастотних коливань на одне загальне навантаження.* Вони класифікуються по:

– фазовим співвідношенням сигналів, що додаються (синфазні, протифазні, квадратурні);

– частотним властивостям (вузькосмугові та широкосмугові);

– елементній базі пристрою (на *R-L-C* елементах, трансформаторні тощо);

– способу додавання (по струму або напрузі).

Вихідний каскад є найбільш потужним каскадом передавача, що споживає більшу частину енергії джерел живлення. Тому якість його роботи

визначає одну з основних важливих характеристик радіопередавального пристрою – коефіцієнт корисної дії.

Навантаженням вихідного каскаду є антена, опір якої в загальному випадку має комплексний характер:

$$Z_A = R_A + jX_A.$$

При чому, при роботі в робочому діапазоні частот передавача активна (R_A) та реактивна (X_A) складові опору змінюються в вельми широких межах. Для отримання в антені максимальної потужності еквівалентний опір антени повинен забезпечити відповідний режим роботи вихідного каскаду – а саме, граничний. При цьому еквівалентний опір навантаження каскаду підсилення повинен бути чисто активним та дорівнювати граничному значенню (**R_e=$R_{ГР}$**).

Залежно від способу включення антени в вихідний ланцюг підсилювача розрізняють наступні схеми (рис. 2.44):

– за *простою схемою* – коли антена підключається безпосередньо до елементів контуру вихідного каскаду;

– за *складною схемою* – антена підключається через додатковий контур.

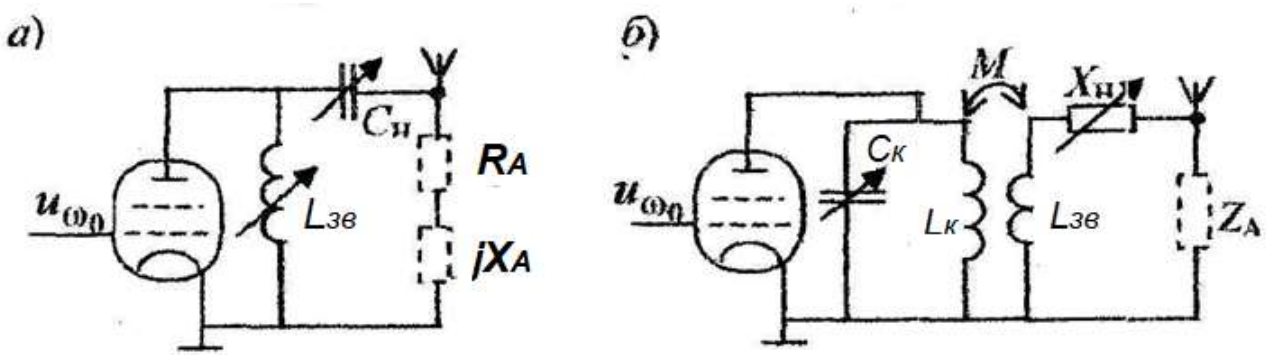


Рис. 2.44 – Проста (а) та складна (б) схеми включення антени до вихідного каскаду підсилювача

Переваги простої схеми:

– високий ККД, так як немає втрат енергії на проміжних елементах;

– простота конструкції та налаштування.

До недоліків можна віднести низьку фільтрацію вищих гармонік (побічних випромінювань).

Такі схеми використовуються в малопотужних передавачах з малим коефіцієнтом перекриття по частоті.

Переваги складної схеми:

– більша вибірковість відносно побічних випромінювань;

– точніше та ширше регулювання значень опору навантаження в вихідному ланцюгу підсилювача, так як воно реалізується двома способами: зміною зв'язку проміжного контуру з антеною і коефіцієнта включення контуру в вихідний ланцюг каскаду (анодний або колекторний);

– менш чутлива до зміни параметрів антени;

– зручність в експлуатації: налаштування контуру в резонанс і регулювання зв'язку мало залежать одне від іншого.

Недоліки складної схеми:

– ККД вихідного ланцюга нижче простої схеми через втрати енергії на проміжному контурі та інших елементах зв'язку;

– складніша конструкція коливальної системи, більші її габаритні розміри та маса;

– складніше налаштування через велику кількості елементів регулювання.

Складна схема включення використовується в широкодіапазонних передавачах малої, середньої та великої потужностей.

Контрольні запитання

1. Склад та вимоги до тракту радіочастоти передавача.
2. Які функції може виконувати ГЗЗ?
3. Склад та призначення елементів підсилювача потужності.
4. Від чого залежить ККД підсилювача та які практичні шляхи його збільшення?
5. Що таке режими роботи «*A*», «*B*», «*C*» та як вони встановлюються?
6. В чому полягають особливості недонапруженого, граничного та перенапруженого режимів підсилювача?
7. Що таке кут відсічки вихідного (анодного) струму підсилювача, як він визначається для різних режимів роботи підсилювача?
8. Яким чином режими роботи підсилювача впливають на ККД та форму вихідного струму?
9. Які режими роботи підсилювача та чому обирають для різних радіосигналів (видів випромінювання)?
10. Що таке динамічна характеристика підсилювача?
11. Яким чином зміна опору навантаження та/або напруги живлення впливають на режими роботи підсилювача та його параметри?
12. Що обмежує смугу підсилення?

13. Які вимоги пред'являють до каскадів попереднього підсилювання?
14. Яким чином підвищують потужність радіосигналу? Які існують методи додавання потужності?
15. В чому полягають особливості простої та складної схем включення антени у вихідний каскад?

2.6. Антенні узгоджувальні пристрої радіопередавачів

Як вже було зазначено раніше, важливою функцією вихідного ланцюга підсилювача є узгодження його опору з опором навантаження (вхідним опором наступного каскаду). Навантаженням вихідного каскаду підсилення є антена, опір якої при роботі передавача в широкому діапазоні частот і при використанні декілька типів антен змінюється в широких межах (рис. 2.45) і має комплексний характер, тобто має активну (R_A) та реактивну (X_A) складові:

$$Z_A(j\omega) = R_A(\omega) + jX_A(\omega).$$

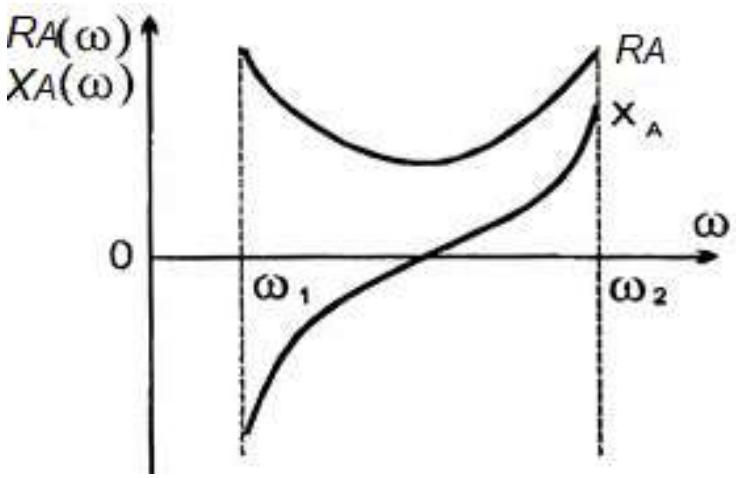


Рис. 2.45 – Приклад залежності опору антени (Z_A) від частоти ($\omega=2\pi f$) в діапазоні $\omega_1 \ldots \omega_2$

Оскільки активний прилад (транзистор, лампа тощо) вихідного каскаду віддає максимальну потужність тільки в чисто активний опір, що дорівнює $R_{гр}$, то виникає необхідність перетворення довільного опору навантаження (Z_A) до цієї величини в усьому діапазоні робочих частот передавача.

Тобто, необхідно *узгодити опір навантаження активного приладу (підсилювального елементу) підсилювача з опором антени*. Елемент передавача, що виконує таку функцію має назву *антенного* ***узгоджувального пристрою (АУП)*** та може конструктивно виділятися в окремий пристрій (особливо для передавачів середньої та великої потужностей).

Таким чином, основним призначенням *антенного узгоджувального пристрою* в передавачі є:

– компенсація реактивної складової вхідного опору антени;

– перетворення (трансформація) активної складової вхідного опору антени в постійний у всьому робочому діапазоні активний опір, який дорівнює граничному Rгр.

До додаткових функцій АУП можна віднести наступні:

– утворення симетричного виходу передавача (при використанні антен з симетричним входом);

– послаблення рівня побічних випромінювань і фільтрація вищих гармонік, що виникають в результаті нелінійних спотворень при посиленні радіосигналів в підсилювачі.

Розрізняють наступні види АУП:

– АУП із параметрами, що не перелаштовуються, для передавачів їз вузьким діапазоном робочих частот:

  – вузькодіапазонні на дискретних LC-елементах;

  – на основі ланцюгів із розподіленими параметрами (на відрізках ліній);

– АУП із ручним налаштуванням;

– АУП із автоматичним налаштуванням.

При налаштованому узгоджувальному пристрої (рис.2.46) з боку вихідного каскаду підсилювача потужності (контакти 1-1) на будь якій робочій частоті (ω) вхідний опір повинен дорівнювати: $\boldsymbol{Z_1(j\omega)=R_н=R_{гр}}$. При цьому передача коливальної потужності підсилювача в антену буде максимальною.

Рис. 2.46 – Вхідний та вихідний опори налаштованого АУП

Можна виділити наступні загальні вимоги до узгоджувальних пристроїв:

– максимальна точність узгодження в робочому діапазоні частот;

– мінімальні втрати енергії;

– фільтрація вищих гармонік неосновних випромінювань;
– простота, однозначність та мінімальний час налаштування.

Фактично узгоджувальний пристрій являє собою частотно-залежний трансформатор опору, що складається з реактивних елементів (індуктивностей та ємностей), які переналаштовуються при кожній зміні частоти та/або типу антени.

Для вирішення основних завдань узгоджувальний пристрій повинен містити не менше двох елементів (рис. 2.47), один з яких умовно називають *компенсуючим*, а інший - *трансформуючим*. З урахуванням залежності обох складових вхідного опору антени від частоти, елементи узгоджувальний ланцюга повинні бути змінними і налаштовуватися незалежно один від одного.

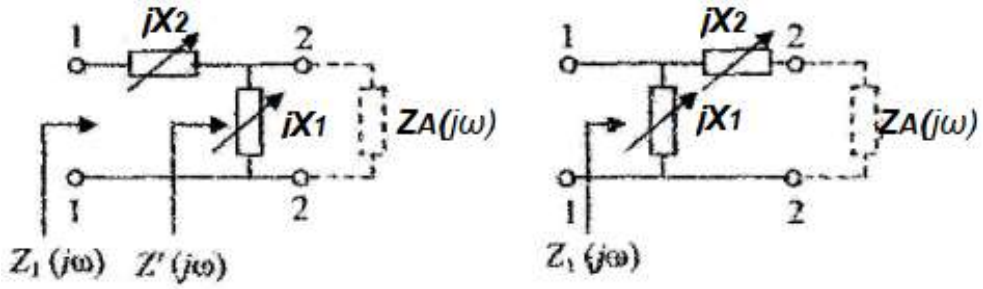


Рис. 2.47 – Узгоджувальні пристрої на основі Т-подібного (а) та П-подібного напівкола (б)

Розглянемо *окремо* вплив послідовного (jX_2) та паралельного (jX_1) *реактивних елементів* на вхідний опір узгоджувального пристрою ($Z_1(j\omega)$).

Послідовний елемент (jX_2) впливає лише на реактивну складову вхідного опору антени:

$$Z_1(j\omega)=R_A(\omega)+jX_A(\omega)+jX_2(\omega).$$

Для отримання вхідного опору чисто активного характеру опір реактивного елементу X_2 повинен бути рівним за величиною та протилежним за знаком реактивному опору антени

$$jX_2(\omega) = -jX_A(\omega).$$

При цьому:

$$jX_A(\omega) + jX_2(\omega)=0, \quad а \quad Z_1(j\omega)=R_A(\omega).$$

На комплексній площі (рис. 2.48) цей процес відображається прямою лінією *AB*, що паралельна осі ординат і проходить через координату R_A.

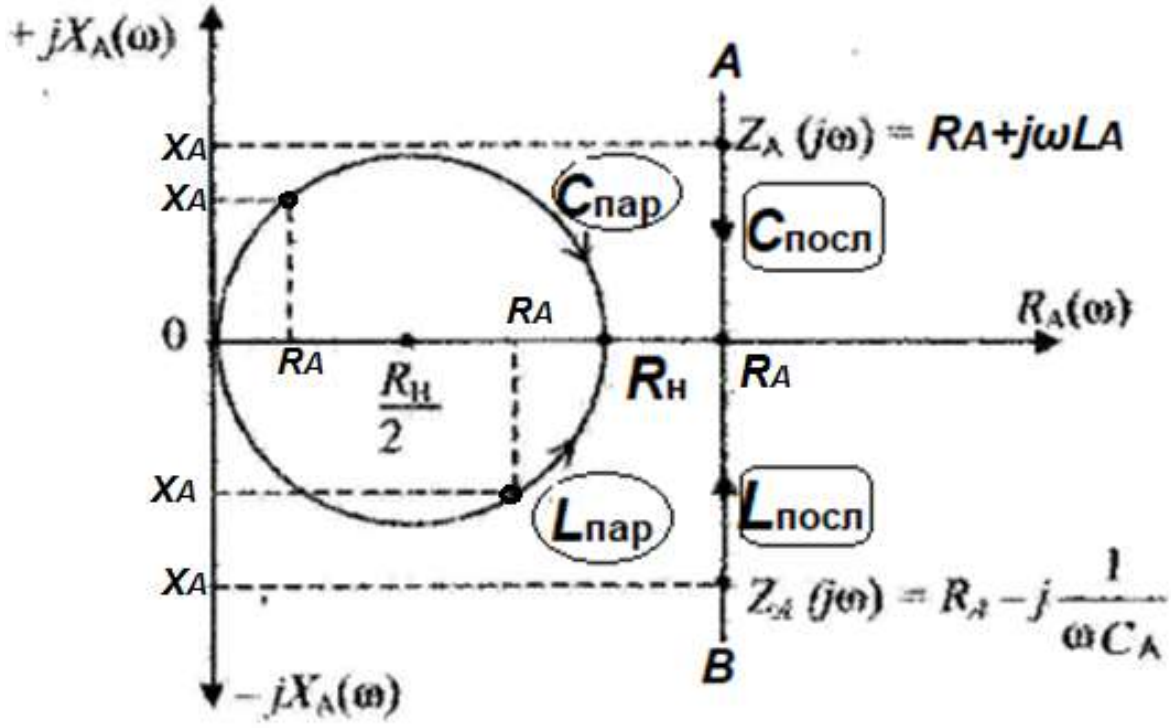


Рис. 2.48 – Процес узгодження опору

Тобто, послідовний реактивний елемент може компенсувати лише реактивну складову опору антени, а не може трансформувати активний опір до необхідної величини $R_н$.

Паралельний елемент (jX_1) узгоджувального пристрою утворює разом з антеною паралельний коливальний контур і може перетворити (трансформувати) як активний, так і реактивний опір антени. Коло з радіусом $R_н/2$ і центром із координатами $X_A(\omega)=0$ та $R_A(\omega)=R_н/2$ визначає множини значень опору антени, які можуть бути перетворені в чисто активну величину $R_н$.

Для узгодження комплексного опору антени будь-якої величини використовують комбіноване (паралельне та послідовне) включення реактивних елементів jX_1 та jX_2, схеми яких визначають можливу область узгодження.

В якості прикладу розглянемо діаграми областей узгодження схем, в яких послідовно включено індуктивність L_2, а паралельно – ємності C_1 або C_3 (рис. 2.49). Визначимо можливі схеми узгоджувальних пристроїв.

Приклад 1: в точці ***B*** опір антени має *індуктивний характер* ($X_A>0$), а активний опір антени більше значення, що потребує навантаження підсилювача ($R_A(\omega)>R_н$).

Рішення:

1) паралельною ємністю *C1* опір спочатку трансформується з точки ***B*** до точки ***C*** (величина ***ωC1*** пропорційна відрізку ***BC***), в якій активний опір дорівнює $R_н$, а реактивний опір має негативне значення;
2) це значення опору можливо компенсувати послідовною індуктивністю *L2* (величина ***ωL2*** пропорційна відрізку ***CA***), в результаті чого опір, який відповідає точці ***A*** перетворюється у величину $R_н$ (схема **а**).

Приклад 2: в точці ***D*** опір антени має *ємнісний характер* (x_A<0), а активний опір антени менше значення, що потребує навантаження підсилювача ($R_A(\omega)$< $R_н$).

Рішення:

1) послідовною індуктивністю *L2* (величина ***ωL2*** пропорційна відрізку ***DE***) опір спочатку трансформується з точки ***D*** до точки ***E***;
2) потім паралельною ємність *C3* (величина ***ωC3*** пропорційна відрізку ***EA***) опір перетворюється в точці ***A*** до необхідного чисто активного значення $R_н$ (схема **б**).

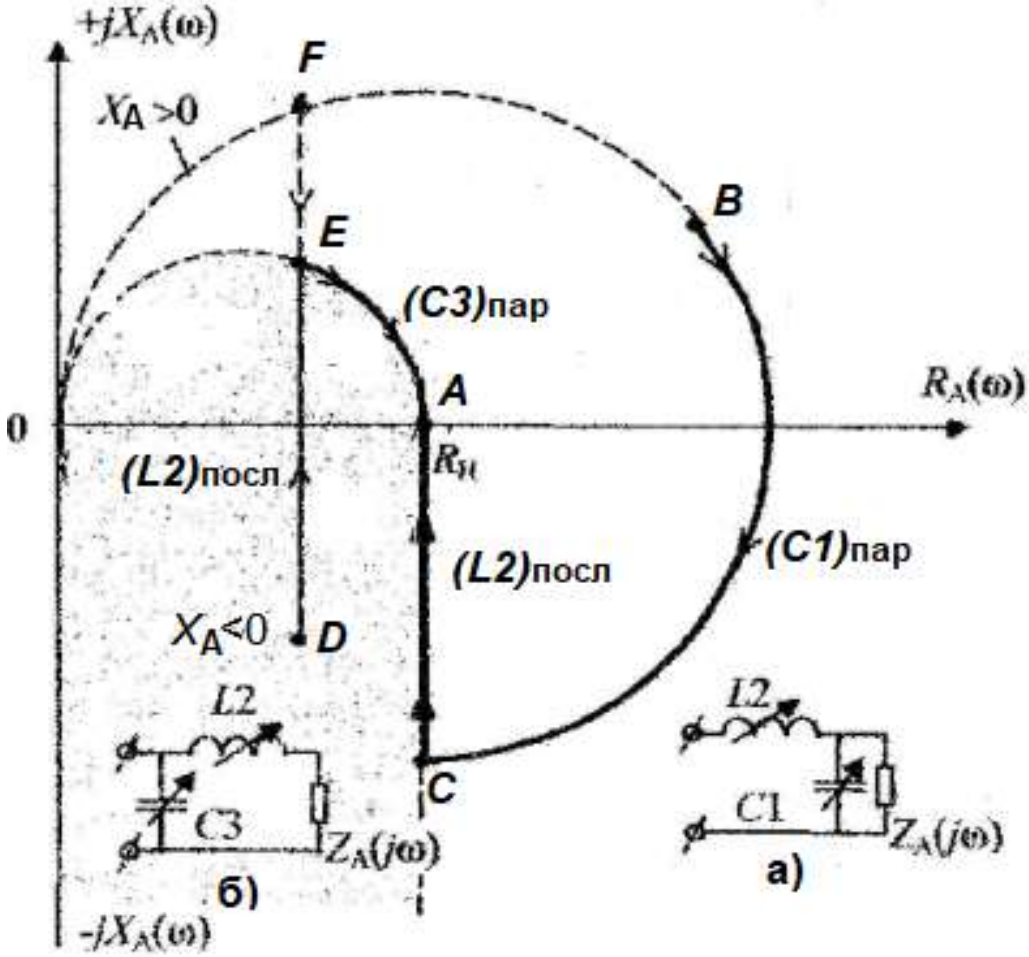


Рис. 2.49 – Приклади графічного розв’язання узгодження опору та відповідні схеми АУП (а та б)

Важливо враховувати при розв'язанні задач наступне**:**

1) розташування елементів в електричній схемі узгоджувального пристрою здійснюється від опору антени (Z_A) згідно з кожним кроком графічного розв'язання;

2) під час графічного розв'язання задач кількість кроків повинна бути *мінімальною* і не перевищувати 2, а кроки при русі по колу – не перевищували 180^0 та не змінювали характер компенсації реактивної складової (з індуктивного та ємнісний та навпаки);

3) *найгіршими схемами* узгоджувального пристрою з точки зору придушення гармонік побічних випромінювань є схеми з паралельною індуктивністю.

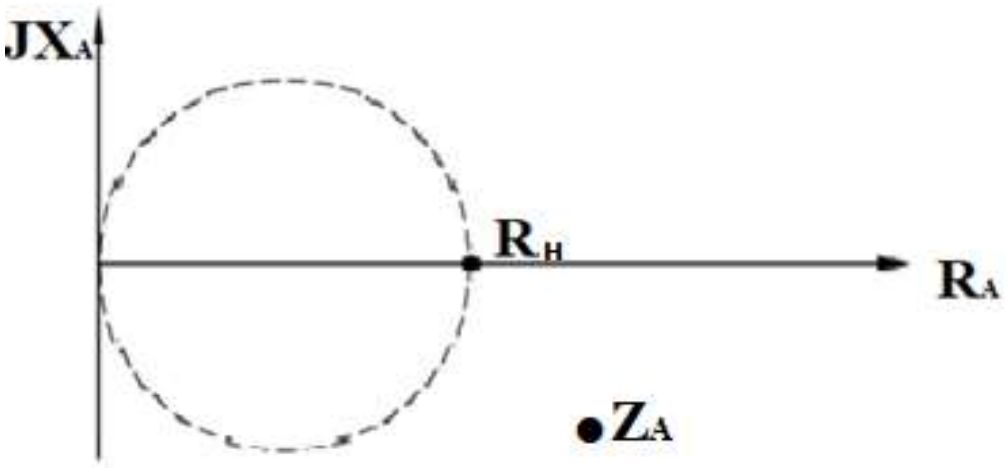
В широкосмугових передавачах частіше, ніж в вузькосмугових підсилювачах, вдаються до поділу функцій фільтрації та трансформації. Крім того, передбачають частотну корекцію для вирівнювання коефіцієнта підсилення, який зменшується зі збільшенням частоти. Припускають, що в певному діапазоні частот активний опір антени залишається постійним, а реактивну складову $X_A(\omega)$ компенсують відповідними схемами з 1-2 постійних елементів.

Такі елементи корекції, які забезпечують узгодження підсилювача потужності з антеною без переналаштування в достатньо широкій смузі робочих частот називають ***широкосмуговими узгоджувальними пристроями***.

Основними типами широкосмугових УП є: П-образні ФНЧ, багатоланкові ФНЧ і смугові фільтри в поєднанні з широкосмуговими трансформаторами і ланцюгами корекції.

Контрольні запитання і завдання

1. Які основні та додаткові функції антенного узгоджувального пристрою?
2. Вимоги до антенного узгоджувального пристрою.
3. Яка мінімальна кількість елементів узгоджувального пристрою і чому необхідна для узгодження довільного комплексного опору антени? Пояснити вплив на опір антени елементів узгоджувального пристрою, які підключені послідовно та паралельно до антени.
4. Побудувати схему узгоджувального пристрою, якщо комплексний опір антени (Z_A) та необхідний опір підсилювача потужності (R_H) мають наступні значення:



(Показати порядок графічного розв'язання задачі стрілками. Визначити оптимальну схему та пояснити за яким критерієм).

РОЗДІЛ 3. ОСНОВИ ПОБУДОВИ РАДІОПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

3.1. Загальні відомості про радіоприймальні пристрої

Призначення радіоприймальних пристроїв

Загальним призначенням радіоприймальних пристроїв *є приймання та використання енергії електромагнітних коливань з метою одержання корисної інформації.*

Радіоприймальний пристрій, як елемент системи зв'язку, *призначений для приймання радіосигналів та перетворення їх у повідомлення* (рис.3.1).

Як технічний пристрій – радіоприймальний пристрій *забезпечує уловлювання енергії електромагнітних хвиль, відділення корисного сигналу, його підсилення та перетворення до виду, зручного до прийняття повідомлення*.

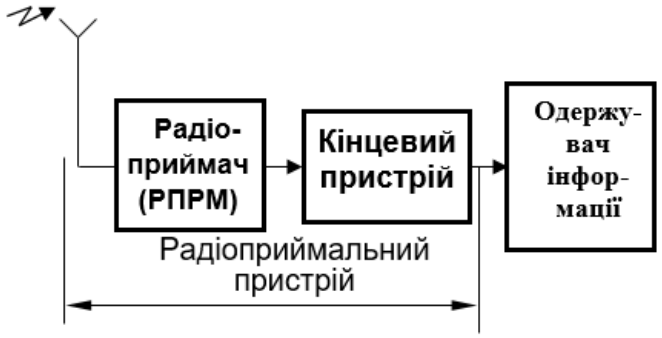


Рис. 3.1 – Структура приймальної частини системи радіозв’язку

Сучасні радіоприймальні пристрої класифікують по ряду ознак (прикмет), які визначають області їх використання і технічні характеристики.

По призначенню:

– професійні (зв'язкові, радіолокаційні, радіонавігаційні, радіотелеметричні тощо);

– радіомовні (прийом програм звукового і телевізійного мовлення).

По діапазону радіочастот: приймачі гектометрових, декаметрових, УКХ, широкосмугові тощо.

По виду сигналів: приймачі безперервних та імпульсних сигналів (АМ, ЧМ, ОСМ, ВФМн, АМн, ЧМн…).

По місцю встановлення: стаціонарні, бортові, переносні.

По роду роботи: радіотелефонні, радіотелеграфні, передачі даних тощо.

В подальшому будемо розглядати особливості зв’язкових радіоприймальних пристроїв.

Будь-який радіоприймальний пристрій складається з *антени* або антенно-фідерної системи, *радіоприймача* та *кінцевого пристрою* (рис.3.2).

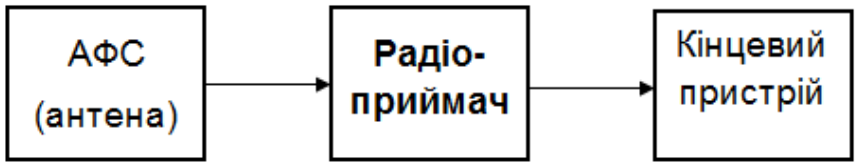


Рис.3.2 – Структура радіоприймального пристрою

АФС забезпечує уловлювання енергії електромагнітних хвиль і перетворення її в електричні коливання (струм, напругу).

Радіоприймач здійснює виділення (селекцію) із множини електричних коливань, діючих в антені, коливань корисного сигналу, їх підсилення та перетворення до виду, потрібного для приведення до дії кінцевого пристрою.

Кінцевий пристрій перетворює електричний сигнал на виході приймача в інший вид енергії, придатний до сприйняття прийнятого повідомлення (звукову, світлову, механічну тощо). В якості кінцевих пристроїв використовуються головні телефони, гучномовець, монітор, телеграфний апарат тощо.

Основні електричні характеристики радіоприймачів

Властивості радіоприймачів характеризуються рядом показників, які визначають галузі можливого їх застосування та якість функцій, що ним виконуються. До них відносять:

- діапазон робочих частот;
- види випромінювань, які приймаються;
- чутливість;
- частотна вибірковість (по сусіднім та дзеркальному каналам);
- динамічний діапазон;
- нелінійні спотворення;
- частотна точність;
- коефіцієнт шуму;
- час настройки приймача;
- рівень вихідного сигналу;
- тип структурної схеми приймача;
- тип антен, що використовуються тощо.

Розглянемо основні з цих характеристик більш детально.

Діапазон робочих частот *− це ділянка спектру радіочастот, у межах якої приймач може приймати радіосигнал з потрібною якістю відтворення первинного електричного сигналу.*

Діапазон робочих частот задається крайніми частотами $f_{c\ \min}$ і $f_{c\ \max}$ і характеризується коефіцієнтом перекриття по частоті:

$$K_{\partial(f)} = \frac{f_{c\max}}{f_{c\min}}.$$

Види роботи ***(****види випромінювань, які приймаються****).*** В радіоприймачах систем радіозв'язку передбачається можливість приймання як безперервних (аналогових) так і дискретних (цифрових) радіосигналів.

Чутливість *− це міра здатності радіоприймача приймати слабкі сигнали та відтворювати їх з необхідною якістю.* Кількісно чутливість оцінюється мінімальним рівнем вхідного сигналу (в одиницях напруги, потужності або питомої потужності), що забезпечує задану вихідну потужність при певних умовах. Розрізнюють граничну, порогову та реальну чутливості радіоприймачів.

Динамічний діапазон *− це інтервал рівнів сигналу на вході приймача, в межах якого сигнал приймається з заданою якістю (з допустимими спотвореннями).* Кількісно динамічний діапазон оцінюється відношенням:

$$Д_{ПР} = \frac{U_{свхмакс}}{U_{свхмін}} \quad \text{або} \quad Д_{пр} = 20\lg\frac{U_{свхмакс}}{U_{свхмін}} \quad [дБ].$$

Мінімальний рівень сигналу ($U_{свхмін}$) обмежується рівнем шумів, які діють на вході приймача, та фактично чутливістю приймача. Максимальний рівень сигналу ($U_{свхмакс}$) визначається допустимими нелінійними спотвореннями сигналу, які виникають у радіоприймачі. Таким чином динамічний діапазон визначає межі лінійної ділянки амплітудної характеристики радіоприймача.

Вибірковість *− це міра здатності приймача відокремлювати корисний сигнал із сукупності сигналів і завад, які діють на його вході.* В залежності від параметра, по якому розділяються сигнал і завади розрізняють *амплітудну, частотну і фазову* вибірковість. В подальшому буде розглядатися тільки ***частотна вибірковість***, яку будемо називати просто *вибірковістю*. Розрізняють *односигнальну* та *багатосигнальну вибірковість*.

Коефіцієнт шуму – оцінює шумові властивості приймача та *показує у скільки разів зменшується відношення середніх потужностей сигналу до шуму на виході приймача порівняно з цим відношенням на його вході:*

$$N = \frac{\left(\frac{P_c}{P_ш}\right)_{ВХ}}{\left(\frac{P_c}{P_ш}\right)_{ВИХ}}.$$

Спотворення сигналів − *це ступінь зміни закону модуляції сигналу при проходженні його через усі тракти приймача*. Розрізняють *нелінійні, амплітудно-частотні* та *фазо-частотні спотворення*, які оцінюються деяким коефіцієнтом спотворень $K_{сп}$ за допомогою амплітудно-частотної, фазочастотної та амплітудної характеристик приймача, а також перехідною характеристикою для приймачів імпульсних сигналів.

Частотна точність − *це міра здатності приймача встановлювати та підтримувати частоту його настройки на заданому номіналі з допустимою похибкою.* Кількісно частотна точність оцінюється ***абсолютною нестабільністю*** – *величиною відхилення частоти налаштування приймача* f_0 *від номінальної частоти* $f_{ном}$, тобто:

$$\Delta f_{Пр} = \left| f_{ном} - f_0 \right|$$

та ***відносною нестабільністю:***

$$\delta_{f\text{пр}} = \frac{\Delta f_{\text{пр}}}{f_{\text{ном}}}.$$

3.2. Радіоприймачі систем радіозв'язку

Основні типи структурних схем радіоприймачів

Розрізняють наступні основні типи структурних схем радіоприймачів:

- приймачі прямого підсилення;
- приймачі супергетеродинного типу;
- приймачі прямого перетворення.

Структурна схема ***приймача прямого підсилення*** (*прямого детектування*) має наступний вигляд (рис.3.3):

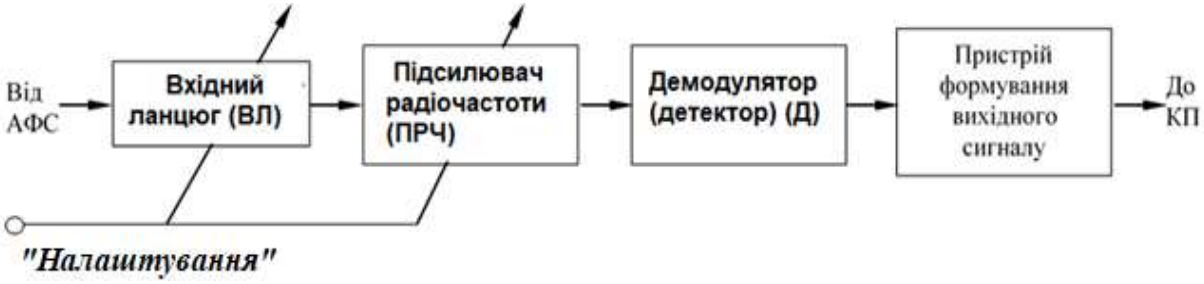


Рис. 3.3 – Структурна схема приймача прямого підсилення

Вхідний ланцюг (ВЛ) є сполучним елементом між АФС і підсилювачем радіочастоти. Він являє собою резонансну коливальну систему, яка налаштовується на частоту корисного сигналу та виконує наступні функції:

– виділяє корисний сигнал і послаблює завади – попередня вибірковість;

– передає напругу (потужність) сигналу від АФС до входу підсилювача радіочастоти з найменшими втратами.

Підсилювач радіочастоти (ПРЧ) реалізується на основі резонансних підсилювальних каскадів, що перестроюються. В ньому здійснюється підсилення корисного сигналу і подальше послаблення завад. *Налаштування ПРЧ і ВЛ спряжені.*

Демодулятор (детектор) – це нелінійний елемент, який забезпечує перетворення радіосигналу у первинний сигнал електрозв'язку, параметри якого відображують зміни модульованих параметрів радіосигналу.

Пристрій формування вихідного сигналу здійснює формування його параметрів, які забезпечують надійну роботу кінцевого пристрою. В залежності від виду сигналу до його складу можуть входити фільтри, підсилювачі, формувачі імпульсів тощо.

Умовою прийому корисного сигналу радіоприймачем прямого підсилення є:

$$f_{0ПРМ} = f_c .$$

Для її технічної реалізації необхідно налаштувати резонансні системи ВЛ і ПРЧ ($f_{0ПРМ}$) радіоприймача на частоту корисного сигналу (f_c).

До переваг приймачів прямого підсилення відносять:

– порівняно проста побудова схеми;

– просте налаштування в діапазоні робочих частот;

– висока стабільність настройки (відсутнє генераторне обладнання);

– відсутність так званих «побічних каналів прийому».

Однак ці схеми не знайшли широкого застосування в сучасних радіоприймачах внаслідок їх недоліків, які обумовлені тим, що *основне підсилення сигналу та його фільтрація здійснюється на частотах радіосигналу*, що *приймаються,* а саме:

– на частотах радіосигналу в широкому діапазоні робочих частот важко забезпечити високий та стійкий коефіцієнт підсилення ПРЧ, який є частотно-залежним, що погіршує чутливість радіоприймача;

– приймачі мають низьку частотну вибірковість внаслідок неможливості побудови складних фільтрів, які переналаштовуються, із високим коефіцієнтом прямокутності характеристики вибірковості, при цьому має місце нерівномірність вибіркових властивостей у діапазоні робочих частот.

Щоб усунути вплив цих недоліків на якість роботи радіоприймача необхідно:

– знизити частоту радіосигналу до постійної величини, на якій можливо побудувати підсилювач із великим і стійким коефіцієнтом підсилення;

– основну фільтрацію сигналу здійснювати в елементі приймача на достатньо низькій і сталій частоті, що дозволить використовувати вибіркові системи з високим коефіцієнтом прямокутності.

Ці міркування реалізуються в *супергетеродинних приймачах*. У схемі такого приймача (рис.3.4) додатковими елементами є *перетворювач частоти* (змішувач + гетеродин) радіосигналу ($\boldsymbol{f_c}$) в більш низьку так звану *проміжну частоту* ($\boldsymbol{f_{ПЧ}}$) та *підсилювач проміжної частоти* (ППрЧ).

В приймачах застосовують:

– ***верхнє*** *налаштування гетеродину:* $\boldsymbol{f_{ПЧ} = f_Г - f_c}$ при $f_Г > f_c$,

або

– ***нижнє*** *налаштування гетеродину:* $\boldsymbol{f_{ПЧ} = f_c - f_Г}$ при $f_Г < f_c$.

При перетворенні сигналу повинна бути збережена як енергетична, так і спектральна його структура.

В супергетеродинних приймачах ***основне підсилення і основна селекція*** *здійснюється* ***на проміжній частоті в підсилювачі проміжної частоти*** (наприклад, підсилення тракту радіочастоти складає (1...2)•10, а тракту проміжної частоти $\approx 10^5$).

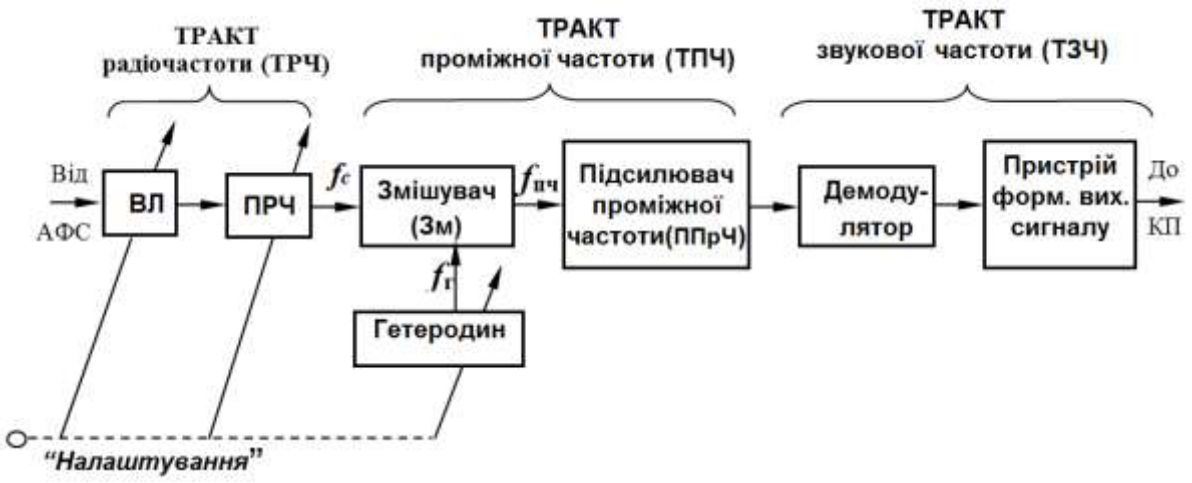


Рис. 3.4 – Структурна схема супергетеродинного приймача

Умовами прийому корисного сигналу супергетеродинним приймачем є:

1. $f_{0\,ТРЧ} = f_c$**;**

2. $f_Г = f_c \pm f_{ПЧ}$,

(у формулі знак «+» застосовується при $f_Г > f_c$, знак «-» − при $f_Г < f_c$).

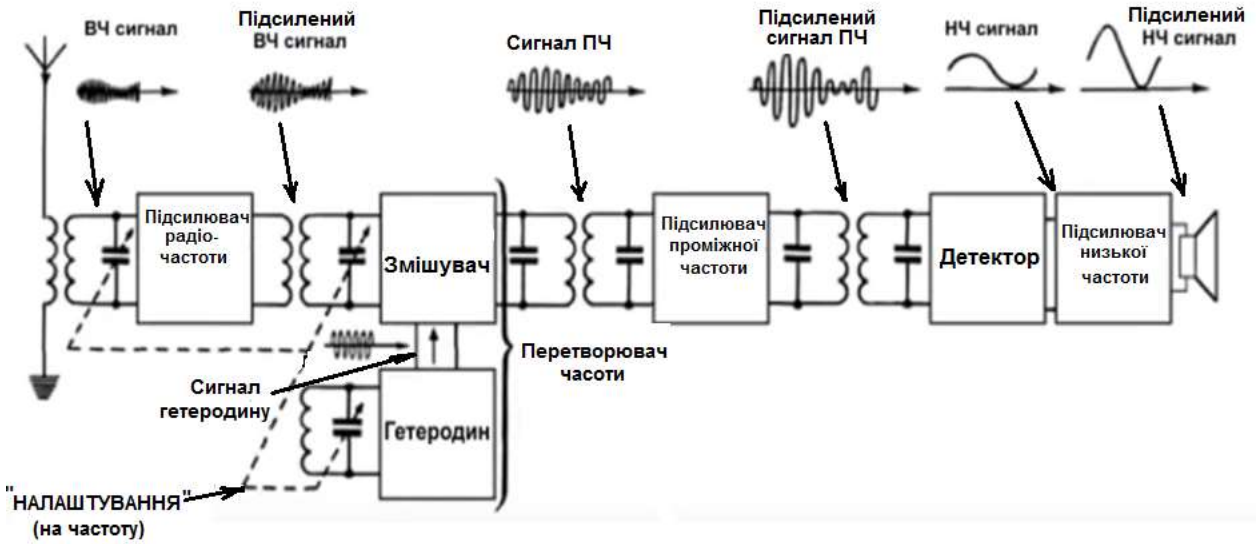


Рис.3.5 – Формування сигналів в елементах супергетеродинного приймача

Налаштування тракту прийому приймача (рис.3.5) на частоту сигналу (f_c) здійснюється перебудовою резонансних систем вхідного ланцюга і підсилювача радіочастоти ($f_{0ТРЧ}$). Для того, щоб частота перетвореного сигналу залишалась сталою ($f_{ПЧ}$=***const***), необхідно змінювати і частоту гетеродину ($f_Г$) таким чином, щоб в залежності від типу настройки гетеродину:

$$f_Г - f_с = f_{ПЧ} = const \quad \text{або} \quad f_с - f_Г = f_{ПЧ} = const.$$

Переваги супергетеродинних приймачів:

– висока і стала чутливість приймача у діапазоні робочих частот за рахунок високого і сталого коефіцієнта підсилення;

– висока і стала вибірковість приймача в діапазоні частот.

Недоліки приймачів супергетеродинного типу:

– складність схеми приймача;

– можливість попадання в антену випромінювання коливань гетеродину;

– менша частотна точність за рахунок нестабільності коливань гетеродину;

– присутність побічних каналів прийому.

Гетеродинний метод прийому радіосигналів використовується також в ***приймачах прямого перетворення*** (рис. 3.6), в яких частота радіосигналу за допомогою коливань синхронного гетеродину (СГ) перетворюється в змішувачі (Зм) до «нульової» проміжної частоти, внаслідок чого спектр радіосигналу відразу переноситься до області частот первинного сигналу.

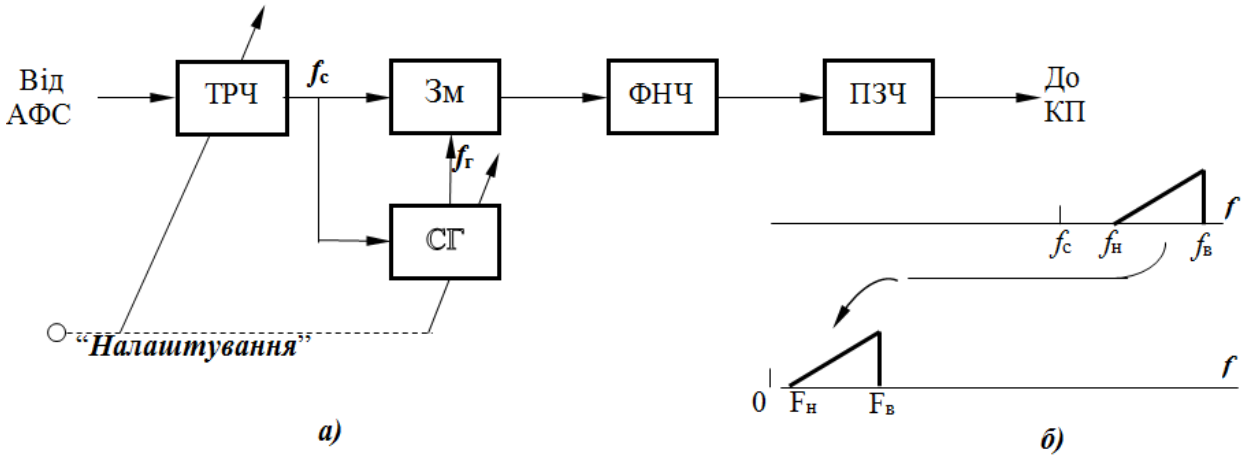


Рис.3.6 – Структурна схема приймача прямого перетворення (а), спектри високочастотного та первинного сигналів для односмугової модуляції (б)

При цьому частота синхронного гетеродину приймається рівною частоті несівних коливань сигналу, а ***умовами прийому корисного сигналу приймачем прямого перетворення*** є:

1) $f_{0\,ТРЧ} = f_с$;
2) $f_{ПЧ} = f_с - f_Г = 0$, тобто $f_Г = f_с$;
3) $f_В - f_Г = F_в$, $f_н - f_Г = F_н$.

Важливо: *синхронізація коливань гетеродину повинна забезпечуватися з точністю до фази відносно несівної сигналу!*

Така схема приймача прямого перетворення називається ***синхродином*** *– супергетеродинним приймачем із «нульовою» проміжною частотою*.

До переваг приймачів прямого перетворення можна віднести наступне:

– простота схеми – функції перетворювача частоти і детектора об‘єднані;

– відсутність побічних каналів прийому.

Недоліки таких схем:

– близькість дзеркального каналу (фактично він є сусіднім каналом) до основного каналу прийому, що ускладнює його фільтрацію на низькій частоті;

– низька завадостійкість ланцюга синхронізації гетеродину;

– більш високі вимоги до лінійності тракту радіочастоти і змішувача.

Потрібність синхронізації частоти гетеродину з частотою сигналу може бути усунена в схемах *приймачів із квадратурним демодулятором* (рис. 3.7), які в своєму складі мають два квадратурних канали прийому (*I* та *Q*), що утворюються за рахунок квадратурних коливань гетеродину x_1 і x_2 (для отримання x_2 використовують фазообертач (ФО), який здійснює зсув фази сигналу гетеродину на величину **π/2**):

$$x_1 = U_{mГ}\cos(\omega_Г t + \varphi); \qquad x_2 = U_{mГ}\sin(\omega_Г t + \varphi),$$

де: φ – фазовий зсув між коливаннями сигналу та гетеродину.

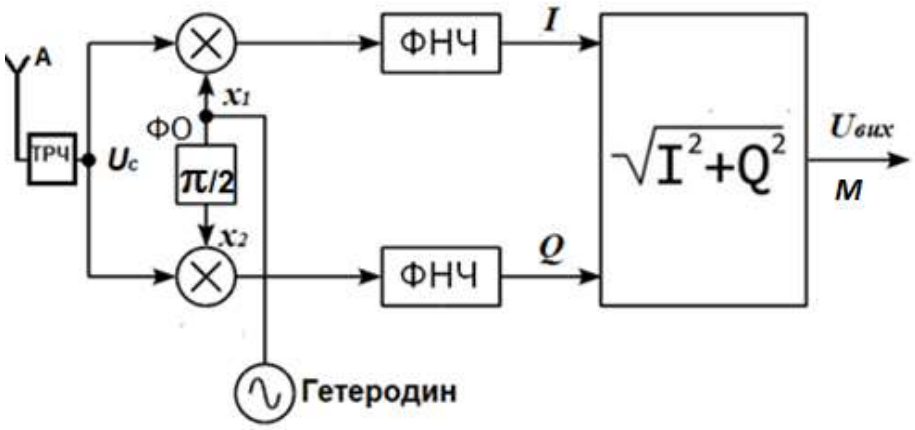


Рис. 3.7 – Спрощена схема приймача прямого перетворення з квадратурним демодулятором

Квадратура демодулятор перетворює дійсну частину високочастотного радіосигналу в його низькочастотний еквівалент.

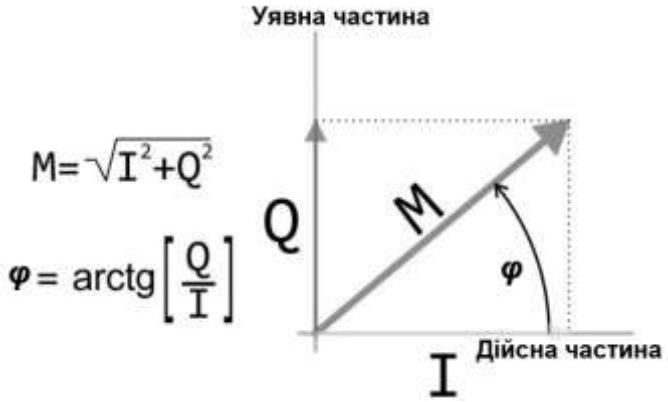


Рис. 3.8 – Дійсна та уявна компоненти радіосигналу

В цій схемі (рис. 3.7) при демодуляції, наприклад, АМ сигналу наступного вигляду:

$$U_C = U_{mC}(1 + m\cos\Omega t)\cos\omega_C t$$

та поклавши $U_{mГ} = 1$, можна довести, що на виході ФНЧ кожного з каналів отримаємо наступні коливання:

$$I = \frac{1}{2}U_{mC}(1 + m\cos\Omega t)\cos\varphi;$$

$$Q = \frac{1}{2}U_{mC}(1 + m\cos\Omega t)\sin\varphi.$$

Якщо у вихідному елементі схеми здійснити операцію виду $U_{вих} = \sqrt{I^2 + Q^2}$, то отримаємо на виході схеми наступний сигнал:

$$U_{вих} = \frac{1}{2}U_{mC}(1 + m\cos\Omega t)\sqrt{\sin^2\varphi + \cos^2\varphi} = \frac{1}{2}U_{mC}(1 + m\cos\Omega t).$$

(Примітка: з тригонометрії відомо, що $(\sin^2\varphi + \cos^2\varphi) = 1$).

Таким чином, вихідна напруга в схемі (рис. 3.7) не залежить від зсуву фаз (φ) корисного сигналу та гетеродину.

Такі приймачі ще називають *асинхронними приймачами прямого перетворення частоти*.

Узагальнена структурна схема професійного радіоприймача

Будь-який професійний радіоприймач у своєму складі має тракти і системи (рис.3.9), які групуються по їх функціональному призначенню. Конструктивно вони можуть бути об'єднаними, або складати окремі блоки (прилади).

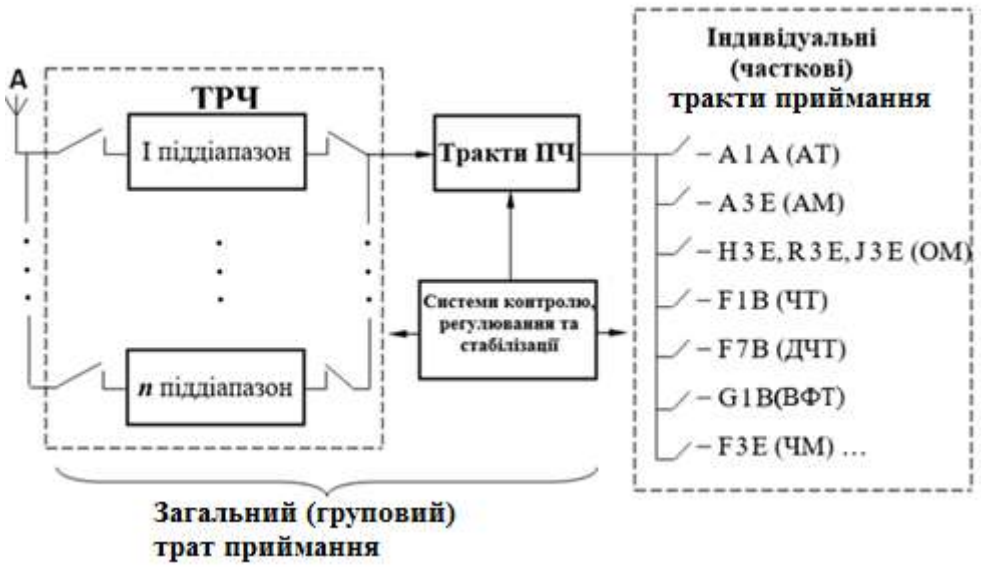


Рис. 3.9 – Узагальнена структурна схема професійного радіоприймача

Загальний (груповий) тракт приймання забезпечує приймання всіх видів сигналів, на які розрахований приймач. В ньому здійснюється перетворення частоти сигналів у проміжну частоту, їх підсилення та послаблення завад по побічним каналам прийому. Для перекриття широкого діапазону частот ТРЧ може поділяться на піддіапазони, які змінюються шляхом перемикання вибіркових систем ТРЧ. В залежності від виду сигналу, що приймається, (його модуляції, ширини спектру) можуть змінюватися і параметри трактів ПЧ (підсилення, смуга пропускання). ТПЧ послаблює завади по сусіднім каналам прийому.

В індивідуальних (часткових) трактах приймання здійснюється обробка кожного з виду випромінювання (модуляції) сигналів, що приймаються: фільтрація, підсилення, детектування і формування вихідних сигналів.

Система управління забезпечує ручне або автоматизоване управління трактами та системами приймача (включення живлення, перебудову частоти, переключення трактів, зміну їх параметрів тощо), в тому числі і дистанційне управління.

Система стабілізації призначена для стабілізації частоти настройки приймача, а також напруги джерел його живлення.

Система контролю здійснює контроль основних параметрів приймача, або його окремих трактів і вузлів при оцінці його працездатності та пошуку несправностей. В залежності від класу приймача вона може бути як ручною, так і автоматичною.

Система регулювання забезпечує регулювання параметрів радіоприймача: підсилення, смуги пропускання, чутливості тощо.

Контрольні запитання

1. Яке призначення радіоприймального пристрою?
2. Які функції виконують елементи радіоприймального пристрою?
3. Назвіть основні характеристики радіоприймача.
4. Які умови прийому корисного сигналу, переваги та недоліки приймачів прямого підсилення?
5. Якими факторами обумовлені нерівномірність чутливості та вибірковості в радіоприймачах прямого підсилення?
6. З якою метою здійснюється перетворення частоти радіосигналу до проміжної частоти?
7. Умови прийому корисного сигналу, переваги та недоліки супергетеродинних приймачів.
8. Умови прийому корисного сигналу, переваги та недоліки приймачів прямого перетворення.
9. Поясніть, яким чином в приймачах технічно реалізуються умови прийому.
10. Який приймач називається синхродином?
11. Яким чином усувається залежність фази вихідного сигналу від фази коливань гетеродину у приймачах з прямим перетворенням частот?

3.3. Коефіцієнт шуму та чутливість радіоприймача

Джерела шумів в радіоприймачі

Радіоприймач, як і будь-який електричний ланцюг, що знаходиться при температурі, яка відрізняється від температури абсолютного нуля (- 273^0 *C*), має власні шуми, які:

– з одного боку обмежують рівень сигналу, який може бути прийнятим, тобто його чутливість;

– з іншого боку – при проходженні сигналу по трактам приймача зменшується співвідношення сигнал/шум, що збільшує спотворення сигналу.

Розглянемо гіпотетичний випадок – маємо *n*-каскадний приймач з однаковими каскадами, в яких:

$$K_{p1}=k_{p2}=....=k_{p\,n}=1 \text{ та } P_{ш1}=P_{ш2}=....P_{ш\,n}=P_{ш,}$$

де $k_{p\,n}$ – коефіцієнт підсилення по потужності, а $P_{шn}$ – потужність шуму *n*-го каскаду.

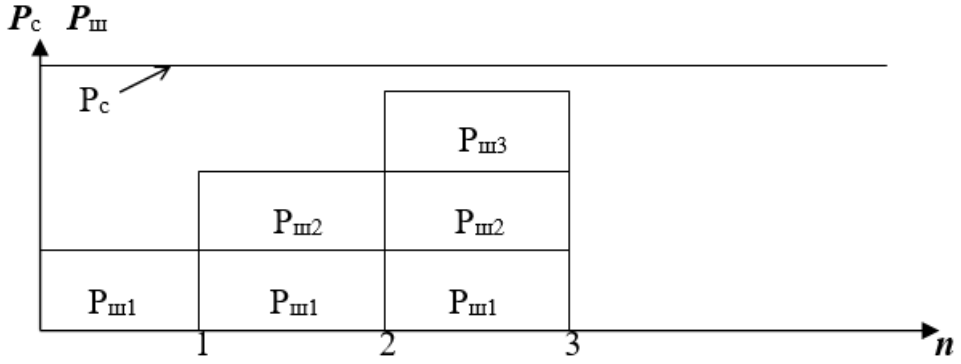


Рис. 3.10 – Накопичення шумів в каскадах

При лінійному режимі роботи каскадів приймача на виході кожного з них можна записати наступні співвідношення:

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш1}}\right)_{ВИХ1}; \qquad \left(\frac{P_c}{P_{ш1}+P_{ш2}}\right)_{ВИХ2} \ldots,$$

тобто при збільшенні числа каскадів співвідношення сигнал/шум на виході кожного наступного каскаду зменшується і може бути меншим 1.

Шумові властивості чотириполюсника оцінюються за допомогою ***коефіцієнта шуму*** *N*, вираз для якого може бути записаним у вигляді співвідношення:

$$N = \frac{\left(\frac{P_C}{P_Ш}\right)_{ВХ}}{\left(\frac{P_C}{P_Ш}\right)_{ВИХ}}.$$

Це співвідношення показує, *у скільки разів зменшується відношення середніх потужностей сигналу до шуму на виході схеми порівняно з цим відношенням на його вході*. ***Важливо:*** для будь-якої частини електричної схеми завжди $N>1$.

Джерелами шумів у приймачах, як і в будь якій електричній схемі є: шуми резисторів, шуми коливальних контурів, шуми електронних приладів тощо. Крім того, слід враховувати теплові шуми антени, які обумовлені опором втрат R_A, а також ті, які виникають внаслідок прийому випромінювань космосу, землі та атмосфери.

Коефіцієнт шуму радіоприймача

Тракт підсилення приймача від входу до детектора являє собою систему лінійних активних чотириполюсників, кожний з яких характеризується *N*, k_p, $\Delta f_{еф}$ (рис.3.11).

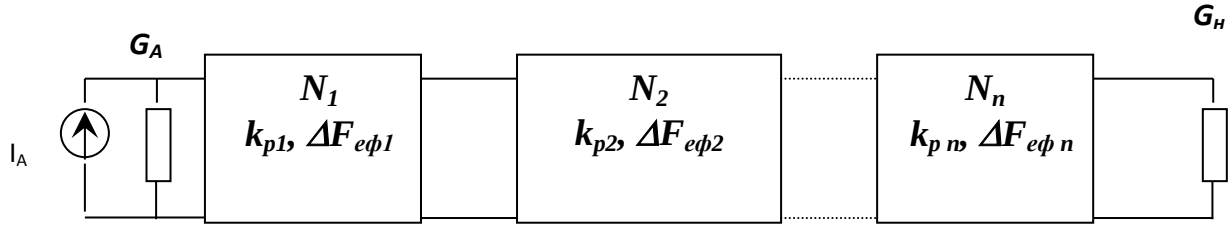


Рис.3.11 – Система лінійних чотириполюсників

– $N_1, N_2, \ldots N_n$ – коефіцієнти шуму чотириполюсників;
– $k_{p1}, k_{p2}, \ldots, k_{pn}$ – коефіцієнти передачі потужності чотириполюсників;
– $\Delta F_{еф1}, \Delta F_{еф2}, .. \Delta F_{ефn}$ – ефективна шумова смуга чотириполюсників.

Знайдемо коефіцієнт шуму лінійного отириполюсника:

$$N = \frac{\frac{P_{\text{свх}}}{P_{\text{швх}}}}{\frac{P_{\text{свих}}}{P_{\text{швих}}}} = \frac{\text{Р}_{\text{свх}}\text{Р}_{\text{швих}}}{\text{Р}_{\text{свих}}\text{Р}_{\text{швх}}}; \qquad \text{Р}_{\text{свих}} = \text{Р}_{\text{свх}}\text{К}_{\text{р}}; \qquad N = \frac{\text{Р}_{\text{швих}}}{\text{Р}_{\text{швх}} \cdot \text{К}_{\text{р}}}.$$

Можливо вивести вираз ***коефіцієнту шуму*** для каскадного з'єднання ***системи лінійних чотириполюсників*** (рис.3.3.1):

$$N_n = N_1 + \frac{N_2 - 1}{K_{p1}} + \frac{N_3 - 1}{K_{p1} \cdot K_{p2}} + \ldots + \frac{N_n - 1}{K_{p1} \cdot K_{p2} \ldots K_{p(n-1)}}.$$

Висновки:

– величина коефіцієнту шуму системи лінійних чотириполюсників (N_n) перш за все залежить від коефіцієнту шуму першого каскаду (N_1);

– кожний наступний каскад впливає на коефіцієнт шуму тим менше, чим більші коефіцієнти підсилення (K_p) мають попередні каскади.

Для визначення коефіцієнту шуму радіоприймача представимо його у вигляді послідовно з'єднаних чотириполюсників, які складають лінійний тракт до детектора (рис.3.12).

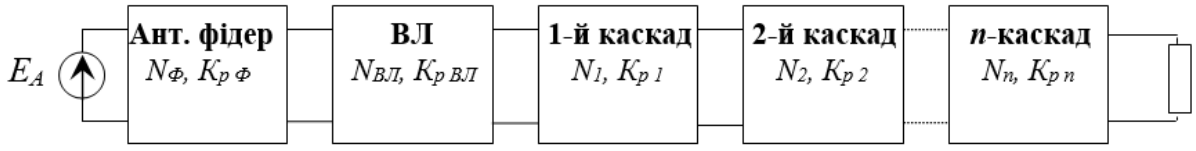


Рис.3.12 – Структура лінійного тракту приймача

Виходячи з формули для системи лінійних чотириполюсників напишемо вираз для коефіцієнту шуму радіоприймача:

$$N_{\text{пр}} = N_{\text{ф}} + \frac{N_{\text{ВЛ}}-1}{\text{К}_{\text{рф}}} + \frac{N_1-1}{\text{К}_{\text{рф}}\text{К}_{\text{РВЛ}}} + \frac{N_2-1}{\text{К}_{\text{рф}}\text{К}_{\text{РВЛ}}\text{К}_{\text{р1}}} + \ldots + \frac{N_{\text{п}}-1}{\text{К}_{\text{рф}}\text{К}_{\text{РВЛ}}\ldots\text{К}_{\text{р}(n-1)}}.$$

Антенний фідер і вхідний ланцюг є пасивні чотириполюсниками, коефіцієнт шуму яких зворотно пропорційний їх коефіцієнтам передачі по номінальній потужності:

$$N_{ф} = \frac{1}{K_{рф}}; \qquad N_{ВЛ} = \frac{1}{K_{РВЛ}}.$$

Їх загальний коефіцієнт шуму буде дорівнювати:

$$N_{\text{ф}} + \frac{N_{\text{ВЛ}}-1}{\text{К}_{\text{рф}}} = \frac{1}{\text{К}_{\text{рф}}} + \frac{\frac{1}{\text{К}_{\text{РВЛ}}}-1}{\text{К}_{\text{рф}}} = \frac{1}{\text{К}_{\text{рф}}\text{К}_{\text{РВЛ}}},$$

який підставимо в формулу та отримаємо вираз для ***коефіцієнту шуму радіоприймача***:

$$N_{Пр} = \frac{1}{K_{рф}K_{рВЛ}}\left(N_1 + \frac{N_2-1}{K_{р1}} + \ldots + \frac{N_n-1}{K_{р1}K_{р2}\ldots K_{р(n-1)}}\right)$$

Практичні висновки з формули (для зменшення коефіцієнту шуму радіоприймача ($N_{Пр}$)):

– необхідно перший каскад підсилення сигналу (ПРЧ) мати з мінімальним коефіцієнтом шуму (N_1), тому що його шуми підсилюються всіма наступними каскадами;

– потрібно, щоб коефіцієнти передачі $k_{\text{рф}}$, $k_{\text{рВЛ}}$, $k_{\text{р1}}$ мали максимальні значення, тобто $k_{\text{рф}}$ і $K_{\text{рВЛ}}$ повинні наближатися до 1, а $K_{\text{р1}}$>>1.

Чутливість радіоприймача

Чутливість радіоприймача характеризує його здатність забезпечувати нормальний прийом слабких сигналів. Чутливість визначається *мінімальним рівнем вхідного сигналу* пристрою, який забезпечує необхідну якість приймання повідомлення.

Кількісно чутливість радіоприймача оцінюється мінімальною величиною ЕРС або мінімальною потужністю радіосигналу в антені (на вході приймача) при яких забезпечується необхідна потужність сигналу на виході при заданому співвідношенні сигнал/завада.

Розрізняють *граничну, порогову та реальну чутливості* приймача. Гранична чутливість характеризує тільки лінійний тракт приймача (до детектора), а порогова та реальна чутливості оцінюють приймач у цілому.

Гранична чутливість *– це мінімальна величина ЕРС (E_A) або номінальної потужності (P_A) сигналу в антені (на вході приймача), при яких* ***на виході лінійного тракту*** *рівень корисного сигналу дорівнює рівню внутрішніх шумів, тобто забезпечується відношення сигнал/шум, що дорівнює одиниці*:

$$\left(\frac{P_c}{P_ш}\right)_{вихЛТр} = \left(\frac{U_c^2}{U_ш^2}\right)_{вихЛТр} = 1,$$

де U_c (P_c), $U_ш$ ($P_ш$) – ефективні напруги (потужності) сигналу та шуму на виході лінійного тракту приймача – тобто на вході детектора.

Порогова чутливість *– це мінімальна величина ЕРС (E_A) або мінімальна потужність (P_A) сигналу в антені (на вході приймача), при яких* ***на виході приймача*** *забезпечується відношення сигнал/шум, що дорівнює одиниці*, тобто:

$$\left(\frac{P_c}{P_ш}\right)_{вихПРМ} = \left(\frac{U_c^2}{U_ш^2}\right)_{вихПРМ} = 1.$$

Реальна чутливість *– це мінімальна ЕРС або мінімальна потужність сигналу в антені, при яких сигнал на виході приймача досягає номінальної величини при заданому відношенні сигнал/шум:*

$$\left(\frac{P_c}{P_ш}\right)_{вихПРМ} = \left(\frac{U_c^2}{U_ш^2}\right)_{вихПРМ} = \gamma.$$

На практиці для приймачів частіше застосовують *реальну чутливість* тому, що для різних способів оброблення сигналів важливим критерієм залишається необхідне мінімальне співвідношення сигнал/шум. Кількісно чутливість може оцінюватися в одиницях напруги, потужності або у відносних (логарифмічних) одиницях.

Чутливість приймача в одиницях потужності

Гранична чутливість може бути знайдена із співвідношення для коефіцієнта шуму:

$$\frac{\left(\frac{P_c}{P_ш}\right)_{вхПр}}{\left(\frac{P_c}{P_ш}\right)_{вихЛТр}} = N_{Пр},$$ але за визначенням: $$\left(\frac{P_c}{P_ш}\right)_{вихЛТр} = 1$$

і при узгодженні антени зі входом приймача ($P_{c\,вх}$=P_A) отримаємо:

$$P_{A_{Гр}} = P_{ш_вхПр} \cdot N_{Пр}.$$

Потужність шуму на вході приймача визначається шумами антени:

$$P_{\text{ш_вхПр}} = kT_a\Delta F_{\text{еф}},\ \text{тому}\ \ \text{Р}_{\text{А}_{\text{Гр}}} = kT_a\Delta F_{\text{еф}}N_{\text{Пр}}\ .$$

При умові $T_a=T_0$, ***гранична чутливість в одиницях потужності*** визначається наступним виразом:

$$P_{\text{А}_{\text{Гр}}} = kT_0\Delta F_{\text{еф}}N_{\text{Пр}}\ [\text{Вт}],$$

де $\Delta F_{еф}$ – ефективна шумова смуга;

k – стала Кельвіна.

Реальна чутливість може бути визначена аналогічним чином:

$$P_{\text{А}_{\text{Реал}}} = kT_0\Delta F_{\text{еф}}N_{\text{Пр}}\gamma\xi \quad [\text{Вт}].$$

У формулу застосовується множник ξ, який враховує зміну відношення $\text{Р}_\text{с}/\text{Р}_\text{ш}$ детектором і наступними каскадами приймача в залежності від видів модуляції та можливих завад (див. табл.3.1).

Табл.3.1 – Значення множника ξ для різних видів модуляції

Вид модуляції	**АМ**	**ОМ**	**ЧМ**			**АТ**
ξ	$\frac{1}{m_{AM}^2}$	1	Сінус. завади	Флуктуац. завади	Імпульсн. завади	1
			$\frac{1}{m_{ЧМ}^2}$	$\frac{1}{3m_{ЧМ}^2}$	$\frac{1}{4m_{ЧМ}^2}$	

Чутливість крім того оцінюють у відносних (логарифмічних) одиницях:

$$\text{Р}_{\text{А}_{\text{Реал}}}[\text{дБм}] = 10\,lg\frac{P_\text{А}}{P_0};\qquad P_0 = 1\cdot 10^{-3}\text{Вт}.$$

Чутливість приймача в одиницях ЕРС

За визначенням чутливість (E_A) – це найменша величина сигналу в антені, при якій на виході приймача, настроєного на частоту сигналу, має місце задане перебільшення сигналу над шумами, а абсолютний рівень сигналу забезпечує нормальну роботу кінцевого пристрою.

При узгодженні антени із входом приймача і шумовій температурі $T_a=T_0$ можна записати:

$$P_{\text{А}_{\text{Реал}}} = \frac{\text{Е}_{\text{А}_0}^2}{4R_\text{А}};\qquad E_{\text{А}_0} = \sqrt{4P_{\text{А}_{\text{Реал}}}R_\text{А}},\quad \text{тобто}$$

$$E_{\text{А}_0}[\text{мкВ}] = \sqrt{4kT_0N_{\text{Пр}}\Delta F_{\text{еф}}R_\text{А}\gamma\xi} = \frac{\beta}{8}\sqrt{N_{\text{Пр}}\Delta F_{\text{еф}}[\text{кГц}]R_\text{А}[\text{кОм}]\xi}\ ,$$

де $\beta = \sqrt{\gamma} = \left(\frac{U_С}{U_Ш}\right)_{\text{вихПРМ}}$ – необхідне перевищення сигналу над шумом по напрузі.

Реальну чутливість в одиницях ЕРС в залежності від виду модуляції сигналу, що приймається, розраховується за наступними виразами:

$$E_{A_0[AM]} = \frac{\beta}{8m_{АМ}}\sqrt{N_{Пр}\Delta F_{еф}R_A} \quad E_{A_0[ОМ]} = \frac{\beta}{8}\sqrt{\dots};$$

$$E_{A_0[ЧМ]} = \frac{\beta}{8\sqrt{3}\ \bullet m_{ЧМ}}\sqrt{\dots}; \qquad E_{A_0[АТ]} = \frac{\beta}{8}\sqrt{\dots}$$

Структура ТРЧ по вимогам до чутливості приймача

Аналізуючи всі види подання чутливості (через E_A, P_A), можна відмітити те, що чутливість приймача визначається шумовими та підсилювальними властивостями каскадів, безпосередньо коефіцієнтом шуму приймача.

Для забезпечення *кращої чутливості* приймача необхідно враховувати наступне:

– щоб всі елементи радіоприймального пристрою, і особливо, які знаходяться на вході, мали можливо менший коефіцієнт шуму, великі коефіцієнти передачі по потужності та вузьку смугу пропускання;

– для ефективної передачі енергії сигналу від антени до входу приймача потрібно забезпечити режим узгодження, при якому коефіцієнт передачі фідера ($k_{рф}$) наближався до 1 (режим біжучої хвилі);

– вхідний ланцюг повинен мати можливо більший коефіцієнт передачі по потужності ($k_{рВЛ}$), до його складу не слід вводити ланцюги з активними втратами, також по можливості використовувати одноконтурні ланцюги з високою добротністю і забезпечувати режим узгодження на вході приймача;

– параметри першого каскаду мають визначаючий вплив на чутливість приймача, його активні електричні прилади повинні мати хороші шумові та підсилювальні параметри, а також оптимальний з точки зору шуму і підсилення вибір схеми його включення та режиму роботи (кращим є комбіноване включення, наприклад, по каскодній схемі).

<u>Контрольні запитання</u>

1. Дайте визначення коефіцієнту шуму електричної схеми та системи лінійних чотириполюсників, назвіть джерела шумів.

2. Запишіть формулу для коефіцієнта шуму радіоприймача і визначте практичні засоби для його зменшення.
3. Визначте поняття граничної, порогової та реальної чутливості радіоприймача. Які ділянки схем приймачів вони характеризують?
4. Як визначають чутливість приймача в одиницях потужності та в логарифмічних одиницях?
5. Яким чином оцінюється чутливість приймача в одиницях ЕРС?
6. Назвіть та поясніть засоби забезпечення високої чутливості приймача.

3.4. Односигнальна та багатосигнальна вибірковості приймача

Односигнальним методом *оцінюються селективні властивості приймача в границях лінійного режиму його роботи, тобто при відносно слабких сигналах на його вході.*

При цьому роблять припущення, що на вході приймача діє радіосигнал однієї частоти з відносно малою амплітудою, сумірний за рівнем із корисним сигналом. Таку вибірковість ще називають *лінійною вибірковістю.*

Односигнальна вибірковість приймача визначається характеристикою односигнальної вибірковості (рис.3.13) (або амплітудно-частотною характеристикою, яка є оберненою характеристикою вибірковості приймача), що представляє собою графік залежності ослаблення чутливості приймача $Д(дБ) = 20lg(E_A/E_{A_0})$ від зміни (Δf) частоти вхідного сигналу (f_c) відносно робочої частоти приймача (f_0).

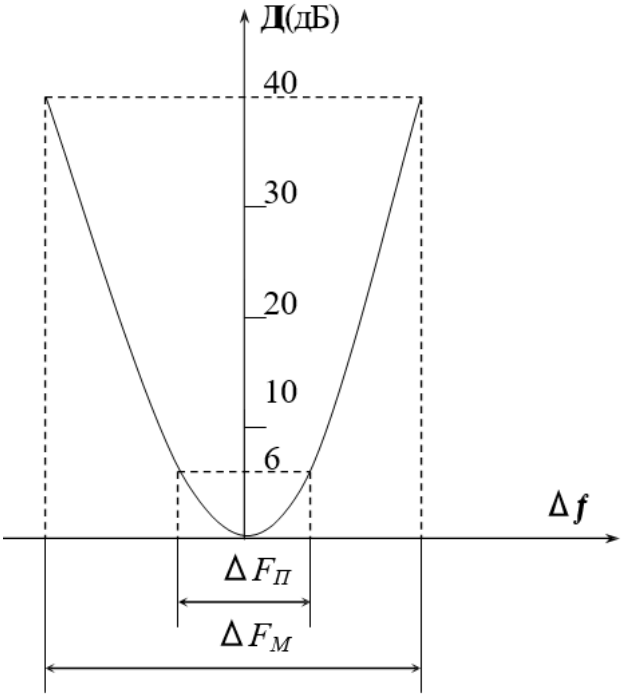


Рис. 3.13 – Характеристика вибірковості приймача

Характеристика вибірковості показує, як погіршується чутливість радіоприймача ($\boldsymbol{E_A}$) при розлаштуванні сигналу (Δf) відносно робочої частоти приймача (f_0) ($\boldsymbol{E_{A_0}}$ − чутливість приймача при $f_c=f_0$, $\boldsymbol{E_A}$ − чутливість приймача, коли $f_c \neq f_0$, $\Delta f=|f_c - f_0|$ − абсолютне розлаштування сигналу відносно f_0).

По цій характеристиці визначаються наступні параметри вибірковості приймача:

– *смугу пропускання приймача* ($\Delta F_п$), що дорівнює подвоєному значенню разлаштування ($2\Delta f$), при якій чутливість приймача зменшується на 6 дБ;

– *смугу мішання* ($\Delta F_М$) – це така смуга частот, в межах якої чутливість приймача зменшується на 20 (або 40) дБ відносно чутливості на робочій частоті (f_0);

– *коефіцієнт прямокутності* ($K_п = \Delta F_п/\Delta F_М$) – визначає ступінь наближення характеристики вибірковості до ідеальної (прямокутної) форми ($K_п$ ідеальної характеристики дорівнює 1, а для реальних характеристик завжди менше 1).

Поняття *сусідніх та побічних каналів прийому* відносяться до односигнальної вибірковості радіоприймача.

Сусідній канал прийому *– це смуга частот, яка примикає до верхньої та/або нижньої границі смуги пропускання приймача та дорівнює їй по ширині.*

Вибірковість по сусідньому каналу ($Д_{ск}$) оцінюється відношенням чутливості приймача на частоті сусіднього каналу до чутливості на основної частоті:

$$Д_{СК(дБ)} = 20\lg\frac{E_{A_{СК}}}{E_{A_0}}.$$

Величина $Д_{СК}$ визначається по результуючій характеристиці вибірковості радіоприймача при заданому розлаштуванні сусіднього каналу $\Delta f_{СК}$ та *показує у скільки разів (на скільки дБ) погіршується чутливість приймача на частоті сусіднього каналу порівняно з чутливістю основного каналу прийому*.

Зазвичай для вибірковості по сусідньому каналу пред'являються вимоги до глибини придушення (не менше 65 дБ) частот першого і другого сусідніх каналів (рис. 3.14).

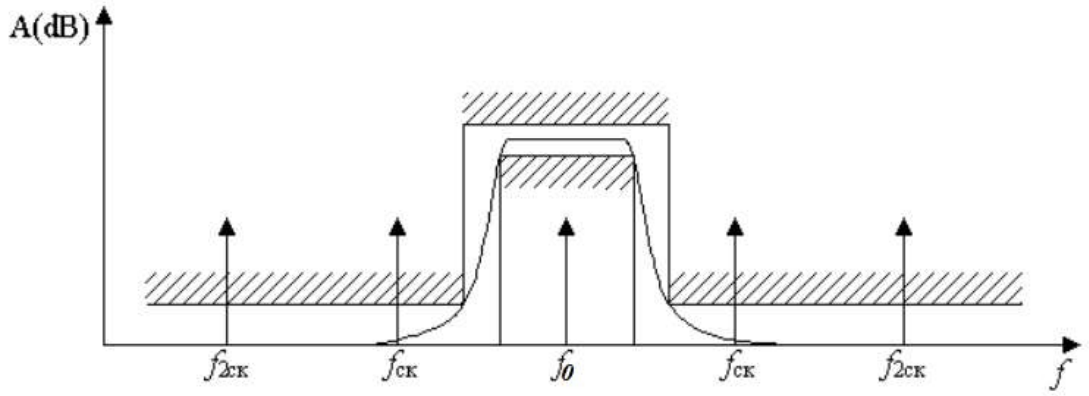


Рис. 3.14 – АЧХ по основному та сусіднім каналам прийому

Побічні канали прийому притаманні тільки для приймачів супергетеродинного типу. Наявність цих каналів обумовлена тим, що до складу приймача входить перетворювач частоти. Внаслідок цього разом з перетворенням частоти корисного сигналу можуть перетворюватися до проміжної частоти інші сигнали, частоти яких з частотою гетеродину або його гармонік також утворюють проміжну частоту.

В загальному випадку *частота каналу приймання* визначається за формулою:

$$f_{\text{КПр}} = \frac{mf_{\text{Г}} \pm f_{\text{ПЧ}}}{n},$$

де $f_{КПр}$ – частота каналу приймання;

m і n – це цілі числа (0; 1; 2...), які позначають номери гармонік коливань сигналу та гетеродину.

В приймачах може використовуватися верхнє ($f_Г > f_{Cmax}$) або нижнє ($f_Г < f_{Cmax}$) налаштування гетеродину.

Для визначення *частоти основного каналу приймання* (каналу приймання корисного сигналу) слід покласти $m=1,\ n=1$ і задатися налаштуванням гетеродину (верхнім або нижнім). Так, при нижньому налаштуванні у формулі використовується знак «+» і частота основного каналу приймання буде дорівнювати:

$$f_{ОК} = f_С = f_{\text{Г}} + f_{\text{ПЧ}}.$$

Тоді частота каналу приймання:

$$f_{\text{КПр}} = f_{\text{Г}} - f_{\text{ПЧ}} = f_{\text{ДзК}}$$

являє собою *побічний канал приймання*, який називається ***симетричним***, або ***дзеркальним*** (рис.3.15).

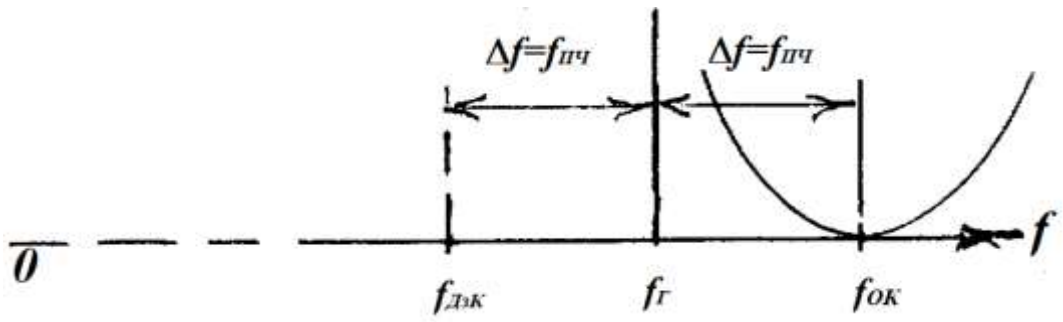


Рис. 3.15 – Утворення дзеркального каналу

Частота дзеркального каналу приймання зміщена від частоти основного каналу на дві проміжних частоти, тобто:

$$\Delta f_{\text{ДзК}} = 2f_{\text{ПЧ}}; \qquad f_{\text{ДзК}} = f_{OK} - 2f_{\text{ПЧ}}.$$

Особливістю цього побічного каналу приймання є те, що його розлаштування відносно основного каналу ($\Delta f_{\text{ДзК}}$) є *сталим* у діапазоні робочих частот, а його частота ($f_{\text{ДзК}}$) *змінюється*.

Якщо в формулі частоти каналу приймання покласти m=0 та n=1, отримаємо:

$$f_{\text{КПр}} = f_{\text{ПЧ}}.$$

Цей канал приймання (без участі частоти гетеродину) називається ***прямим каналом***, або каналом приймання ***на проміжній частоті***. Частота цього побічного каналу є *сталою*, а розлаштування відносно основного каналу *змінюється* при перестройці приймача:

$$\Delta f_{\text{К}_{\text{ПЧ}}} = |f_{\text{ОК}} - f_{\text{ПЧ}}|.$$

Таким чином, до побічних каналів приймання в супергетеродинних приймачах відносять:

- дзеркальний канал приймання;
- канал приймання на проміжній частоті.

Крім розглянутих побічних каналів приймання можуть утворюватися канали завад, які перетворюються у проміжну частоту на гармоніках гетеродину (n=1, m=2, 3…) і гармоніках завади (m=1, n=2, 3,…), тобто

$$f_{\text{КПр}} = mf_{\text{Г}} \pm f_{\text{ПЧ}}; \qquad f_{\text{КПр}} = \frac{(f_{\text{Г}} \pm f_{\text{ПЧ}})}{n}.$$

При визначенні вимог до радіоприймача задаються параметри, що визначають придушення сигналів побічних каналів приймання. Зазвичай вимоги по побічним каналам приймання задаються не гірше придушення по сусідньому каналу, а в ряді випадків значно жорсткіше. Придушення побічних каналів в сучасних аналогових трактах приймання становить не менше 80 дБ.

Лінійна вибірковість не дає повного уявлення про селективні властивості приймача, який працює в реальних умовах при наявності сигналів, що заважають та розташованих поза основного каналу приймання, а рівні яких можуть значно перевищувати рівень корисного сигналу. У цьому випадку вводиться поняття *реальної вибірковості,* яка оцінюється багатосигнальним методом.

Під ***багатосигнальною вибірковістю*** *радіоприймача розуміють його здатність приймати корисний сигнал із потрібною якістю в умовах дії на вході приймача потужних позасмугових завад, які викликають в ньому нелінійні явища.*

Багатосигнальна вибірковість радіоприймача в значній мірі визначається структурою та параметрами тракту радіочастоти.

Виділяють наступні *нелінійні явища в приймачі*:

- ***блокування***;
- ***перехресну модуляцію***;
- ***взаємну модуляцію*** **(інтермодуляцію).**

Коли амплітуда напруги завади $U_з$ перебільшує інтервал зміни напруги в межах лінійного відрізку характеристики активного приладу, тоді він переходить в нелінійний режим роботи. При цьому середня крутизна характеристики зменшується, зменшується і підсилення корисного сигналу каскадом (рис.3.16). Цей ефект називають ***блокуванням.***

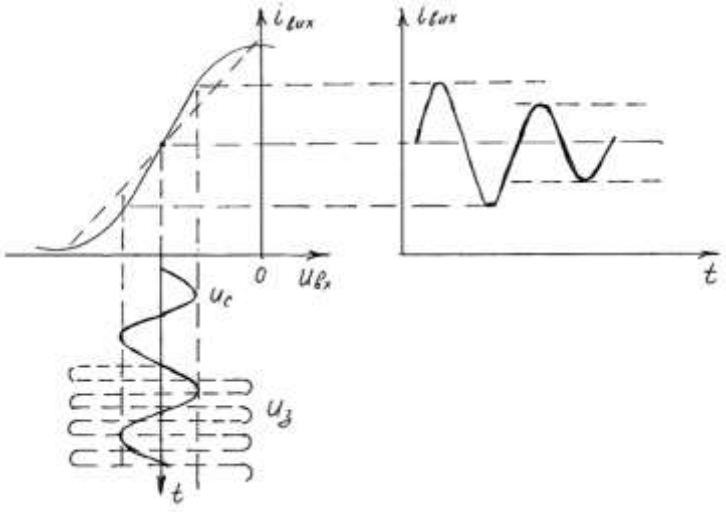


Рис.3.16 – Ефект блокування

Якщо завада буде модульована по амплітуді, то очевидно, що середня крутизна прохідної характеристики буде змінюватися з частотою модуляції. При цьому коефіцієнт підсилення каскаду буде також змінюватися, внаслідок чого корисний сигнал буде модульовано за законом модуляції завади. Таким чином модуляція завади переноситься на корисний сигнал, а такий нелінійний ефект називають ***перехресною модуляцією***.

Якщо на вході ПРЧ приймача діють декілька потужних завад на частотах $f_{з1}$, $f_{з2}$, $f_{з3}$..., то вони внаслідок нелінійного перетворення в електронному приладі підсилювача утворюють ряд гармонік: $mf_{з1}$, $mf_{з2}$, $mf_{з3}$, …(де m=0, 1, 2, 3...). При цьому в складі струму електронного приладу можуть виникати інтермодуляційні коливання:

$$f_i = mf_{з1} \pm mf_{з2} \pm mf_{з3}\ldots, \qquad f_i = m_1 f_{з1} \pm m_2 f_{з2} \pm m_3 f_{з3}\ , \ldots..$$

Якщо одна або декілька частот f_i співпадають з частотою налаштування приймача або частотами побічних каналів прийому, то це ***інтермодуляційне коливання*** проходить в тракт прийому як адитивна завада.

Розглянуті нелінійні явища можуть бути причиною спотворень корисного сигналу. Але радіоприймач має бути сконструйованим таким чином, щоб при наявності всіх цих явищ прийом сигналу здійснювався з допустимими спотвореннями. Це власне і складає багатосигнальну вибірковість радіоприймача.

Багатосигнальна вибірковість радіоприймачів оцінюється декількома критеріями і параметрами. Для їх визначення розглянемо деякі аналітичні співвідношення.

Блокування – це зміна рівня корисного сигналу або зменшення відношення сигнал/шум на виході приймача під впливом діючої на його вході завади, яка розстроєна по частоті відносно основного та побічних каналів прийому.

Ступінь впливу завади на рівень сигналу оцінюється відношенням величини зміни рівня сигналу на виході каскаду приймача під впливом завади до рівня сигналу, коли завада відсутня. Це відношення називається ***коефіцієнтом блокування*** і він визначає якість прийому сигналу в умовах блокування радіоприймача потужною завадою:

$$K_{бл} = \frac{1}{4}\frac{S''}{S} U_{mз}^2,$$

де S, S'' – крутизна прохідної характеристики активного елементу підсилювача та його друга похідна;

$U_{mз}$ – амплітуда напруги завади.

Практично при експлуатації радіоприймачів зазвичай визначається *амплітуда блокуючої завади* при заданому допустимому коефіцієнті блокування ($K_{\text{бл доп}} \leq 0{,}2$):

$$U_{\text{тздоп}} \leq \sqrt{4К_{\text{блдоп}} \frac{S}{S''}}.$$

Перехресні спотворення сигналу оцінюються допустимим рівнем завади на вході електронного приладу, яка викликає перехресну модуляцію при заданому допустимому коефіцієнті ($K_{пер\ доп}$=0,01 або 0,03):

$$U_{\text{тздоп}} \leq \sqrt{2K_{\text{пердоп}} \frac{S}{S''}}.$$

Для оцінки впливу завади при взаємній модуляції (інтермодуляції) використовують наступний вираз для допустимої завади:

$$U_{\text{тздоп}} \leq \sqrt{2К_{\text{вздоп}} \frac{S}{S'} U_{mc}}.$$

Послаблення завад побічних каналів прийому здійснюється в основному двома засобами:

- зменшенням кількості побічних каналів прийому;
- зменшенням чутливості побічних каналів прийому.

Перша задача вирішується шляхом забезпечення лінійності перетворювання частоти перетворювачем, тобто зменшенням числа (інтенсивності) гармонік гетеродину та сигналу.

Вирішення другої задачі здійснюється за рахунок ослаблення завад, діючих на частотах побічних каналів, вибірковими системами тракту радіочастоти (за рахунок вибірковості ТРЧ).

Для покращення багатосигнальної вибірковості приймача застосовують наступні практичні заходи:

- використовують у ПРЧ електронний прилад, який має мінімальний параметр нелінійності *S''/S*, тобто – з можливо більшою лінійністю прохідної характеристики;
- зменшують напругу завади на вході електронного приладу $U_{mз}$ за рахунок підвищення вибірковості вхідного ланцюга ТРЧ шляхом збільшення кількості контурів у фільтруючому ланцюгу та покращення їх добротності.

Контрольні запитання і завдання

1. Які селективні властивості приймача визначаються односигнальним методом?

2. Що таке характеристика вибірковості приймача?
3. Як розрахувати частоти основного та побічних каналів приймання? В чому їх особливість?
4. Розрахувати частоту дзеркального каналу приймача з верхнім налаштуванням гетеродину, якщо $f_{пч}$=300 кГц приймається сигнал із частотою f_c=151,5 МГц.
5. Розрахувати центральну частоту *лівого* сусіднього каналу, якщо $f_{пч}$=300 кГц, f_c=150,5 МГц, а ширина смуги сигналу, що приймається – ΔF=50 кГц.
6. Які властивості радіоприймача оцінюють багатосигнальною вибірковістю?
7. Які нелінійні явища можуть виникати в приймачі, в чому полягає їх сутність та які наслідки?
8. Яким чином оцінюють вплив завад на роботу приймача?
9. Яким чином покращують багатосигнальну вибірковість радіоприймача?

3.5. Особливості та характеристики основних трактів і систем радіоприймачів

Тракт прийому сигналів супергетеродинного радіоприймача складається з (рис.3.17):

- тракту радіочастоти (ТРЧ);
- тракту проміжної частоти (ТПЧ);
- тракту звукової частоти (ТЗЧ).

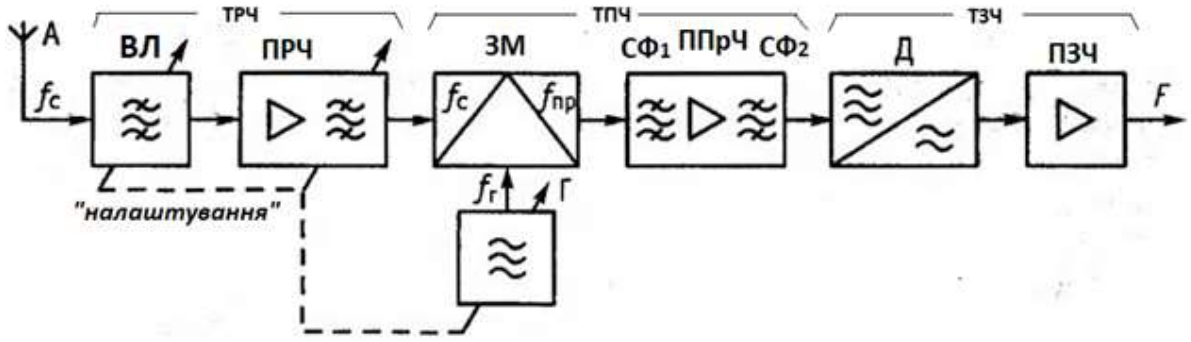


Рис.3.17 – Структура тракту прийому супергетеродинного приймача

Тракт радіочастоти

В ТРЧ здійснюється фільтрація корисного сигналу від завад у діапазоні робочих частот приймача та підсилення сигналу до рівня, який потрібний для роботи перетворювача частот.

Для виконання цих функцій до складу ТРЧ входять підсилювач радіосигналу і резонансні системи, що перебудовуються та вмикаються на його вході як вхідний ланцюг і як навантаження підсилювача.

Внаслідок необхідності перебудови резонансні системи ТРЧ не можуть бути складними – зазвичай вони мають один, або два контури, а їх вибірковість не може бути високою. Тому електричні коливання, частоти яких близькі до частоти корисного сигналу у ТРЧ придушуються не повністю, а їх основна фільтрація відбувається у наступних трактах приймача.

Але фільтри ТРЧ виконують дуже важливу роль у послабленні завад по так званим *побічним каналам прийому*, які мають місце у приймачах супергетеродинного типу.

Розглянемо коротко утворення цих каналів та вплив діючих у них завад на прийом корисного сигналу. Уявимо приймач, в якого антена підключена безпосередньо до входу змішувача. У цьому разі приймач буде приймати всі сигнали, які відповідають таким умовам (рис. 3.18):

$$f_Г - \boldsymbol{f_{c1}} = f_{пч}; \qquad \boldsymbol{f_{c2}} - f_Г = f_{пч}; \qquad \boldsymbol{f_{c3}} = f_{пч}.$$

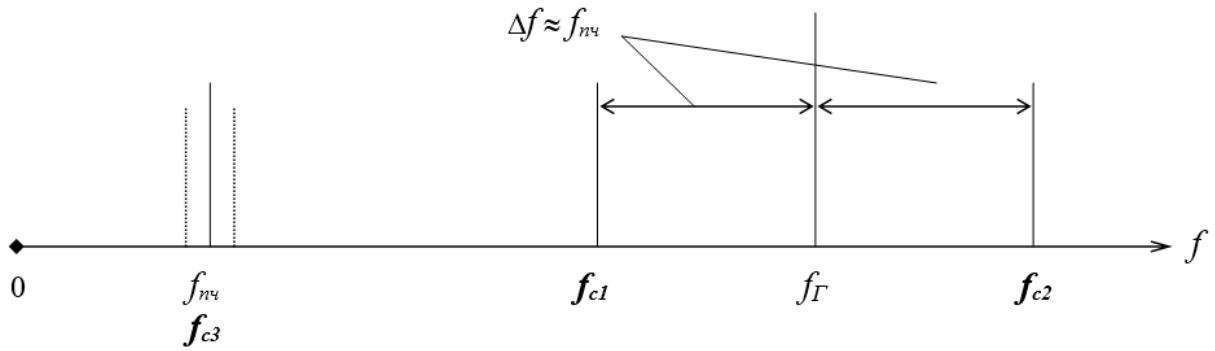


Рис. 3.18 – Утворення побічних каналів прийому

Якщо вважати, що корисний сигнал діє, наприклад, на частоті $\boldsymbol{f_{c1}}$ (верхнє налаштування гетеродину), то сигнали на частотах $\boldsymbol{f_{c2}}$ і $\boldsymbol{f_{c3}}$ будуть завадами, які маскують корисний сигнал на частоті $\boldsymbol{f_{пч}}$.

Канал прийому на частоті $\boldsymbol{f_{c2}}$ є симетричним відносно каналу прийому на частоті f_{c1} і називається ***дзеркальним каналом прийому***, а завада, яка діє у ньому – *дзеркальною завадою*. Канал прийому на частоті $\boldsymbol{f_{c3} = f_{пч}}$ має назву ***каналу прийому на проміжній частоті***, а завада, яка діє у ньому – *завадою на проміжній частоті*.

Для загальної характеристики канал прийому корисного сигналу зветься ***основним***, а канали на частотах *дзеркальної* і проміжної – ***побічними каналами прийому***.

Приймач повинний бути побудований таким чином, щоб на вході змішувача рівні цих завад були значно меншими рівня корисного сигналу. Це забезпечується коливальними системами ТРЧ, які налаштовуються на частоту корисного сигналу.

Ще однією важливою функцією ТРЧ є *захист приймача від потужних, так званих позасмугових завад*. Сучасні приймачі працюють в умовах складної електромагнітної обстановки. В антенах наводяться ЕРС передавачами своїх або сусідніх радіосистем, які можуть досягати великих значень. Хоча частоти цих завад не збігаються з частотами налаштування приймача, внаслідок недостатнього послаблення у вхідних ланцюгах вони можуть викликати перевантаження підсилювача радіочастоти. При збільшенні рівня напруги на вході активного елемента (транзистора, електронної лампи…) ПРЧ середня крутизна його прохідної характеристики може зменшуватися. Внаслідок цього зменшується коефіцієнт підсилення каскаду для корисного сигналу. Крім цього можуть виникати і такі нелінійні ефекти, як перенесення модуляції з завади на сигнал, комбінаційні завади тощо.

Для послаблення впливу сильних позасмугових завад використовують наступне:

– електронні пристрої ПРЧ вибирають з широким динамічним діапазоном по рівню вхідного сигналу;

– на вході ТРЧ вмикають атенюатори;

– вхідний ланцюг роблять багатоконтурним, що покращує послаблення завад на вході ПРЧ.

– підсилення корисного сигналу в ТРЧ робиться невеликим (K_U = 5...20), тому що потужні позасмугові завади не цілком придушуються фільтрами тракту і при значному підсиленні можуть викликати перевантаження змішувача.

Тракт проміжної частоти

У ТПЧ здійснюється перетворення частоти радіосигналу з робочого діапазону (f_c) у проміжну частоту ($f_{ПЧ}$). Крім цього в ньому виконується основна фільтрація сигналу та його основне підсилення до рівня, потрібного для роботи демодулятора. Частота сигналу перетворюється у змішувачі за допомогою напруги частоти гетеродину ($f_Г$). При цьому важливо забезпечити лінійний режим перетворення, тобто перенесення спектру сигналу до області проміжної частоти зі збереженням його закону модуляції.

Проміжна частота може бути отримана при двох співвідношеннях частот сигналу та гетеродину (рис.3.19):

а) $f_c - f_Г = f_{ПЧ}$ або б) $f_Г - f_c = f_{ПЧ}$.

В конкретному приймачі може застосовуватися перетворення частоти *тільки* з нижнім (рис. 3.19а) або тільки з верхнім (рис. 3.19б) налаштуванням гетеродину.

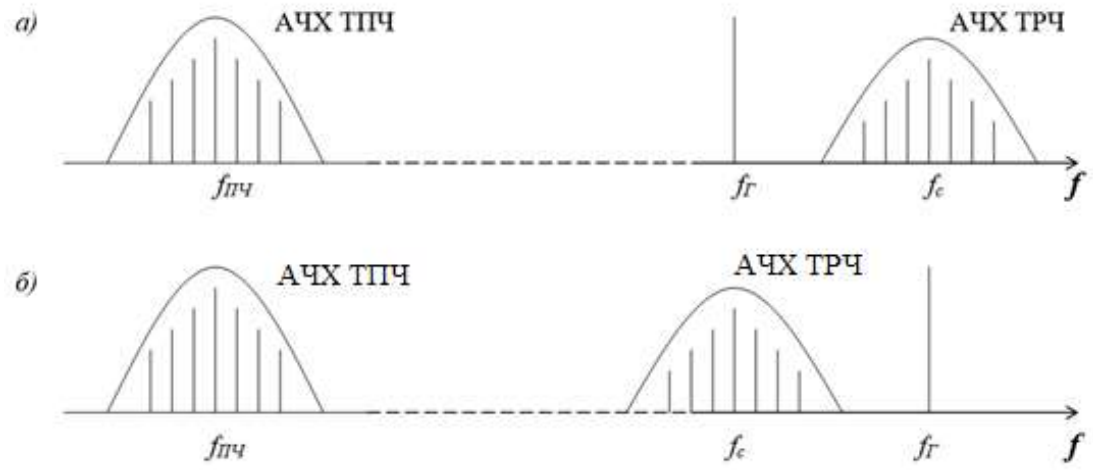


Рис.3.19 – АЧХ трактів ТРЧ та ТПЧ для різних налаштувань гетеродину

Смуговий фільтр на виході змішувача ($СФ_1$ на рис.3.17) призначений для відділення напруги проміжної частоти ($f_{ПЧ}$) і є, зазвичай, кварцовим або багатоланцюговим *LC*-фільтром зосередженої вибірковості (ФЗВ), смуга пропускання якого регулюється в залежності від виду сигналу (його ширини спектру), що приймається.

Підсилювач у ТПЧ забезпечує основне підсилення сигналу ($К_U \approx 10^3 \ldots 10^5$) та є багатокаскадним, причому частина його каскадів може бути включена після ФЗВ у частковому тракті прийому.

Другий смуговий фільтр ($СФ_2$) призначений для основної фільтрації сигналу від завад. Його амплітудно-частотна характеристика повинна бути близькою до прямокутної, тому він будується на основі кварцових або механічних резонаторів і має декілька ланок. Смуга пропускання фільтра є змінною та залежить від спектру сигналу, що приймається. В сучасних приймачах для кожного виду сигналу застосовують відповідний фільтр, який може входити до складу часткового тракту прийому сигналу.

Тракт звукової (низької) частоти

У цьому тракті здійснюється демодуляція сигналу і його формування до виду, необхідного для приведення до дії кінцевого пристрою. Так, при

прийомі телефонних сигналів з різними видами модуляцій до тракту будуть входити відповідні детектори та підсилювач звукової частоти. При прийомі телеграфних сигналів до складу тракту увійдуть, крім детектора, імпульсні формуючі пристрої тощо.

Системи регулювання підсилення

Внаслідок різних причин рівень сигналу на вході приймача може змінюватися в значних межах. Якщо розглядати приймач як лінійний підсилювач, то на його виході напруга також буде змінюватися в тих же межах. Однак, кінцеві пристрої, які підключаються до приймача, мають порівняно вузький динамічний діапазон по рівню вхідного сигналу (2…3 рази відносно номінального), велике збільшення якого може привести до появи неприпустимих спотворень.

В самому приймачі його каскади, які мають електронні прилади, також розраховуються до рівня сигналу, при якому його спотворення знаходяться у межах заданих вимог. В цілому приймач розраховується таким чином, щоб при рівні сигналу на його вході, рівному чутливості, на виході приймача була номінальна напруга $E_{Ao} \to U_{вих.ном}$, а його каскади працювали без перевантаження. Таким чином при збільшенні сигналу вище рівня чутливості потрібно зменшувати підсилення приймача. Для цього призначена система регулювання підсилення.

В приймачах радіозв'язку, як правило, передбачається *ручне (*РРП) та/або *автоматичне регулювання підсилення (*АРП).

РРП використовують для встановлення початкового режиму роботи приймача та при повільній зміні рівня вхідного сигналу. В підсилювачах звукових частот зазвичай застосовують плавне потенціометричне регулювання підсилення (рис.3.20).

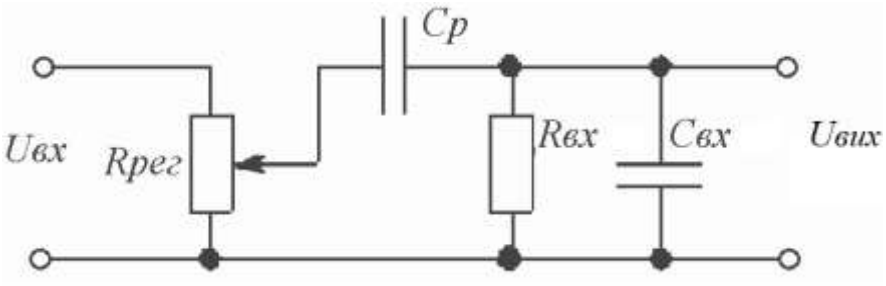


Рис.3.20 – Приклад РРП для регулювання гучності

Цей вид регулювання називають *регулюванням гучності*. Регулювальний опір зазвичай ставиться між виходом детектора і входом першого каскаду підсилювача звукової частоти.

Окрім потенціометричного часто застосовують (особливо в широкосмугових каскадах підсилення відеосигналів) регулювання підсилення за допомогою зміни глибини *негативного зворотного зв'язку* (НЗЗ) (рис.3.21).

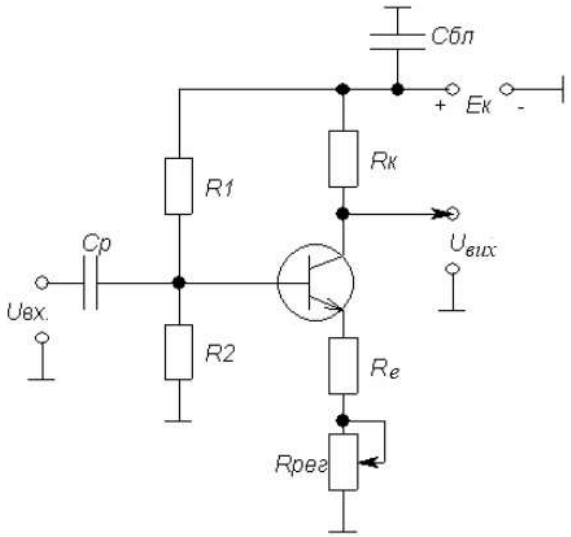


Рис.3.21 – Приклад РРП за допомогою зміни глибини НЗЗ

Змінюючи величину опору резистора $R_{рег}$, змінюється глибина НЗЗ і відповідно коефіцієнт підсилення підсилювача: при збільшенні опору резистора $R_{рег}$ глибина НЗС збільшується, а коефіцієнт підсилення зменшується, і навпаки.

В підсилювачах радіочастоти та проміжної частоти регулювання підсилення зміною глибини НЗЗ може здійснюватися, наприклад, зміною ємності $C_{рег}$ (рис.3.22), роль якої виконує варикап Д: зі збільшенням напруги регулювання $E_{рег}$ діод Д закривається, його ємність $C_{рег}$ зменшується, глибина НЗЗ збільшується, а коефіцієнт посилення підсилювача зменшується, і навпаки.

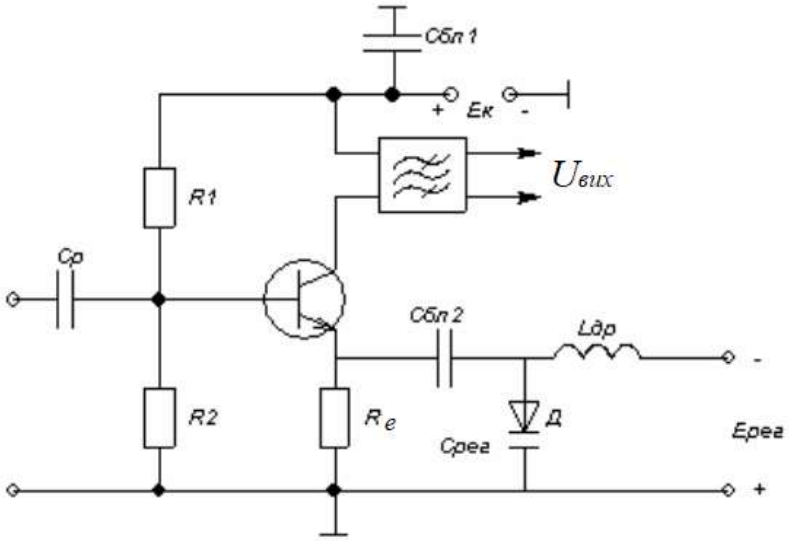


Рис.3.22 – Приклад регулювання підсилення в ПРЧ та ППрЧ

Автоматичне регулювання підсилення (АРП) в радіоприймачах зазвичай здійснюється в тракті проміжної частоти та призначено для підтримання сталості рівня сигналу на виході ППрЧ, необхідного для нормальної роботи вихідних пристроїв приймача.

Пристрій АРП включає в себе: детектор АРП, фільтр, що усуває дію АРП на швидкі зміни рівня ВЧ сигналу під дією модуляції сигналом переданої інформації, і підсилювачі, що регулюються.

Залежно від способу подачі напруги регулювання підсилювача ($E_{рег}$) АРП поділяють на *зворотні* (рис.3.23*), прямі* та *комбіновані*.

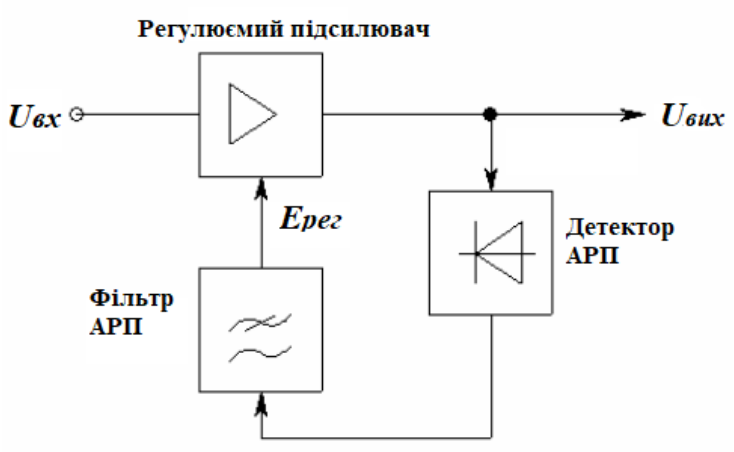


Рис.3.23 – Схема зворотного АРП

Для раціонального використання переваг прямих та зворотних схем АРП (стабільність зворотного АРП і можливість отримати ідеальну характеристику в прямій АРП) є застосування схеми комбінованого АРП (рис.3.24).

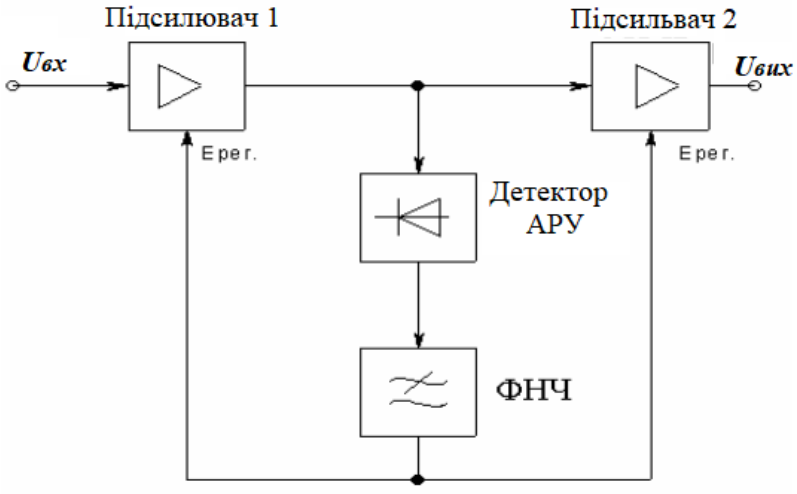


Рис.3.24 – Схема комбінованого АРП

Недолік простих схем АРП полягає в тому, що коефіцієнт підсилення радіотракту приймача може зменшуватися і при прийомі сигналів малого рівня. Для його усунення використовують АРП *із затримкою*, в яких система регулювання починає діяти, коли напруга $U_{вх}$ перевищує деяке порогове значення ($U_{пор}$), при цьому слабкі сигнали системою АРП не послабляються.

Регулювання смуги пропускання в радіоприймачах

Регулювання смуги пропускання використовується в радіоприймачах для прийому сигналів з різними по ширині спектру. Доцільно мати можливість звужувати смугу пропускання до мінімально необхідної величини, що забезпечує відповідну якість відтворення сигналу. При дуже високому рівні завад іноді вдається забезпечити прийом сигналу шляхом подальшого звуження смуги, але ціною погіршення якості відтворення сигналу. Принципово можлива як *ручне*, так і *автоматичне регулювання смуги пропускання* приймача. Регулювання смуги може бути здійснено зміною параметрів або зміною смугових фільтрів. Якщо приймач призначений для приймання сигналів різних видів випромінювання, то зручніше та конструктивно простіше використовувати стрибкоподібну зміну смуги пропускання шляхом перемикання декількох різних фільтрів, які включаються в тракт ППрЧ. В сучасних професійних приймачах для цього широке застосування знаходять кварцові фільтри.

Контрольні запитання

1. Назвіть функції та склад основних трактів прийому супергетеродинного радіоприймача.
2. Яким чином виникають побічні канали прийому в супергетеродинному приймачі та на яких частотах завади по цим каналам діють?
3. Що таке перетворення частоти сигналу з нижнім та верхнім налаштуванням гетеродину?
4. Задача: розрахувати частоту дзеркального каналу приймача з верхнім налаштуванням гетеродину та проміжною частотою $f_{пр}$=455 кГц при прийомі сигналу радіомовної станції на частоті f_c=101,5 МГц.
5. Задача: розрахувати частоту лівого сусіднього каналу приймача при прийомі сигналу радіостанції на частоті f_c=155,1 МГц з шириною смуги 12,5 кГц.
6. Як впливають сильні поза смугові завади на прийом корисного сигналу радіоприймачем та які заходи приймають для зменшення цього впливу?
7. Для чого в приймачах використовують системи регулювання потужності сигналу, де і яким чином це реалізується?

8. Як працюють системи АРП?
9. Для чого в приймачах використовують системи регулювання смуги пропускання, де і яким чином це реалізується?

3.6. Вхідні ланцюги радіоприймачів

Вхідний ланцюг (ВЛ) *представляє собою частину тракту радіочастоти* (рис.3.25)*, яка призначена для передачі енергії сигналу від антени до входу першого активного каскаду (підсилювача радіочастоти або перетворювача частоти), а також попередньої фільтрації завад радіо прийому*.

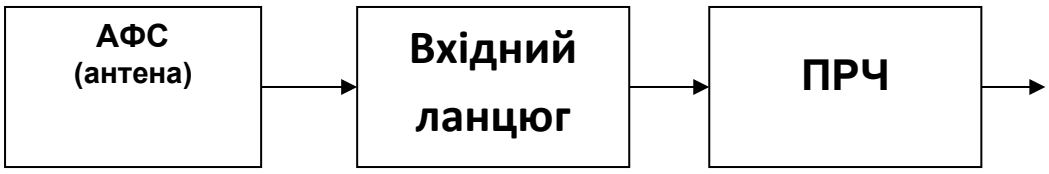


Рис.3.25 – Структура тракту радіочастоти приймача

Вхідний ланцюг виконує наступні важливі функції:

– забезпечує вибірковість по побічним каналам прийому;

– ослаблює позасмугові завади та забезпечує лінійний режим роботи каскадів підсилення, що покращує багатосигнальну та реальну вибірковість приймача;

– узгоджує антенно-фідерну систему з входом приймача, чим підвищує коефіцієнт передачі та чутливість приймача.

До вхідних ланцюгів висуваються наступні вимоги:

– високий коефіцієнт передачі (малі втрати енергії);

– висока вибірковість, тобто значне придушення позасмугових завад, які не співпадають з частотою сигналу, що приймається;

– малі частотні спотворення сигналу, які обумовлені нерівномірністю АЧХ ВЛ;

– малі нелінійні спотворення сигналу, які можуть виникати при включенні у ВЛ нелінійних елементів (варикапів, електронних ключів тощо);

– малий коефіцієнт шуму;

– забезпечення постійності параметрів ВЛ (коефіцієнта передачі, вибірковості) у всьому діапазоні робочих частот та зміні типу антени.

Вхідний ланцюг можливо представити структурною схемою, яка зображена на рис. 3.26:

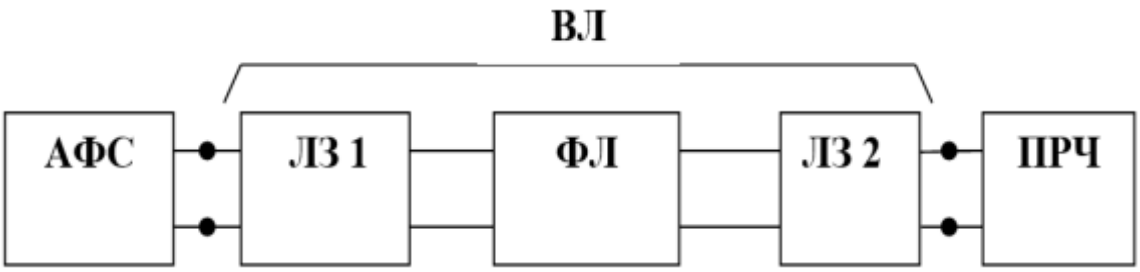


Рис. 3.26 – Структура вхідного ланцюга

В схемі позначено: ФЛ - фільтруючий ланцюг; ЛЗ 1 - ланцюг зв'язку АФС з фільтруючим ланцюгом; ЛЗ 2 - ланцюг зв'язку ФЛ із входом підсилювача радіочастоти.

Вхідні ланцюги класифікують за наступними основними ознаками:

1) *за видом фільтруючого ланцюга*:
   – одноконтурні;
   – багатоконтурні (найчастіше – двоконтурні);
2) *за видом зв'язку фільтруючого ланцюга з антеною*:
   – антена може бути підключена безпосередньо до фільтруючого ланцюга (може привести до погіршення добротності та розлаштуванні контурів фільтруючого ланцюга і використовується лише в рамочних або магнітних антенах);
   – антена може бути підключена через реактивний елемент ємнісного або індуктивного характеру:
      – ємнісний зв'язок антени з ФЛ;
      – трансформаторний зв'язок;
      – автотрансформаторний зв'язок.
3) *за видом зв'язку фільтруючого ланцюга з підсилювачем радіочастоти* (вибір виду і ступеню зв'язку ФЛ з ПРЧ визначається величиною і характером вхідного опору першого каскаду):
   – *повне включення*, яке забезпечує максимальний коефіцієнт передачі вхідного ланцюга (при високому вхідному опору і малій вхідній ємності ПРЧ);
   – *неповне включення* (при малому вхідному опорі підсилювача радіочастоти для зменшення його шунтуючого впливу на ФЛ та з метою зменшення коефіцієнту шуму радіоприймача):
      – трансформаторне;
      – автотрансформаторне;
      – за допомогою ємнісного дільника.

4) *за способом налаштування фільтруючого ланцюга:*

– з плавним налаштуванням (конденсатором змінної ємності, варикапом або варіометром);

– з дискретним налаштуванням (дискретним конденсатором змінної ємності, переключенням смугових фільтрів тощо).

5) за конструктивним виконанням:

– на елементах із *зосередженими параметрами* – використовуються у декаметровому і метровому діапазонах хвиль;

– на елементах із *розподіленими параметрами* (на коаксіальних та хвильових резонаторах тощо) - використовуються у дециметровому діапазоні хвиль;

6) за симетрією входу:

– з симетричним входом (при використанні симетричної антени);

– з несиметричним входом.

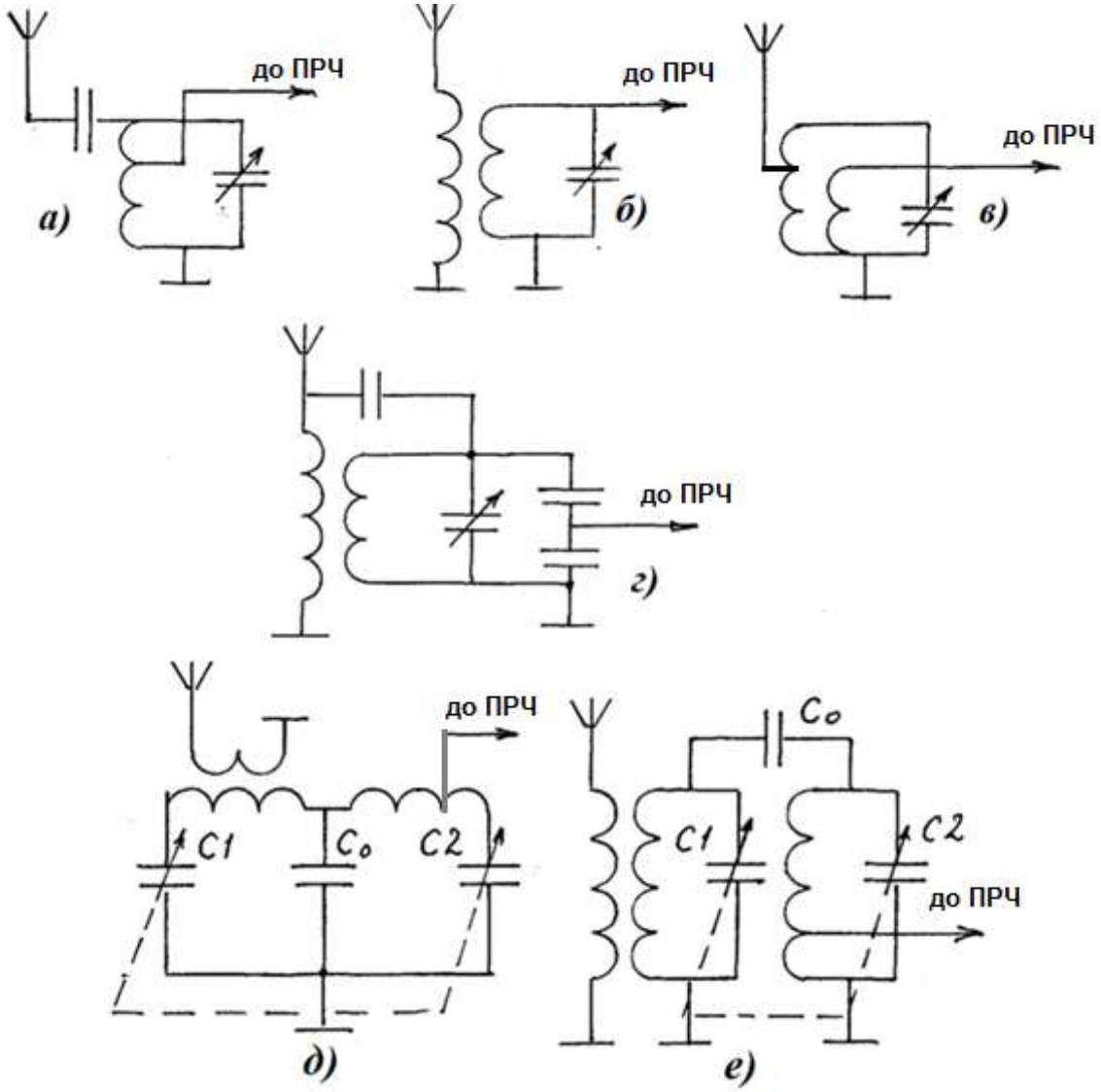


Рис. 3.27 – Різновиди вхідних ланцюгів

На рис. 3.27а,б,в,г приведені схеми з *одноконтурним* фільтруючим ланцюгом відповідно з *ємнісним, індуктивним* (трансформаторним та автотрансформаторним) та *комбінованим* зв'язком з антеною.

Включення в контур фільтруючого ланцюга першого каскаду ПРЧ – відповідно *автотрансформаторне, повне, трансформаторне* та за допомогою *ємнісного дільника*.

На рис. 3.27*д*,е фільтруючі ланцюги ВЛ є *двоконтурними* з *індуктивним зв'язком* з антеною, *внутрішньо ємнісним* (*д*) і *зовнішньо ємнісним* (е) зв'язком контурів та *автотрансформаторним* зв'язком з ПРЧ.

Якісні показники вхідних ланцюгів

Вхідний ланцюг (рис.3.28) являю собою пасивний чотириполюсник (ФЛ), зв'язаний ланцюгами зв'язку з АФС (Л31) та входом першого каскаду підсилювача радіочастоти (Л32).

Рис.3.28 – Структура вхідного ланцюга

Коефіцієнти передачі вхідного ланцюга:

– *по напрузі* – визначається як відношення комплексної амплітуди напруги на вході першого каскаду до комплексної амплітуди ЕРС, яка наводиться в антені:

$$K_{U_{\text{ВЛ}}} = \frac{U_2}{E_A};$$

– *по потужності* – дорівнює відношенню середньої потужності сигналу на вході першого каскаду до середньої потужності сигналу в антені:

$$K_{\text{Р}_{\text{ВЛ}}} = \frac{\text{Р}_2}{\text{Р}_A},$$

де $P_2 = U^2_2 / R_{вх}$ – потужність на вході ПРЧ;

$P_A = E^2_A / 4R_A$ – потужність сигналу в антені.

$$K_{\text{Р}_{\text{ВЛ}}} = 4K^2{}_{U_{\text{ВЛ}}} \frac{R_A}{R_{\text{ВХ}}}.$$

Коефіцієнт передачі напруги може бути як більше, так і менше одиниці, а $K_{Рвл}$ - завжди менше одиниці.

Вибірковість вхідного ланцюга – це відношення коефіцієнта передачі на резонансній частоті до коефіцієнту передачі при заданому розлаштуванні частоти Δf:

$$Д = \frac{К_{ВЛ_0}}{К_{ВЛ}(\Delta f)}$$

де $\Delta f = |f - f_0|$ – абсолютне розлаштування частоти.

Характер залежності вибірковості ВЛ визначається результуючим загасанням сигналу у фільтруючому ланцюзі, а також кількістю контурів і параметром зв'язку між ними.

Діапазонні властивості вхідних ланцюгів

Професійні радіоприймачі працюють, як правило, у широкому діапазоні частот. Тому для налаштування приймача на частоту корисного сигналу вхідні ланцюги повинні перебудовуватися, що реалізується шляхом зміни реактивних параметрів фільтруючого ланцюга. При цьому може змінюватися як ємність, так і індуктивність контурів, що входять до складу ФЛ. Зміна індуктивності використовується при малих коефіцієнтах перекриття діапазону частот.

Найчастіше в радіоприймачах використовується налаштування зміною (плавно або дискретно) ємнісного параметра контурів за допомогою конденсаторів змінної ємності або варикапів.

Налаштування реактивних параметрів фільтруючого ланцюга при зміні частоти корисного сигналу (f_0) призводить до зміни коефіцієнту передачі ВЛ (рис.3.29).

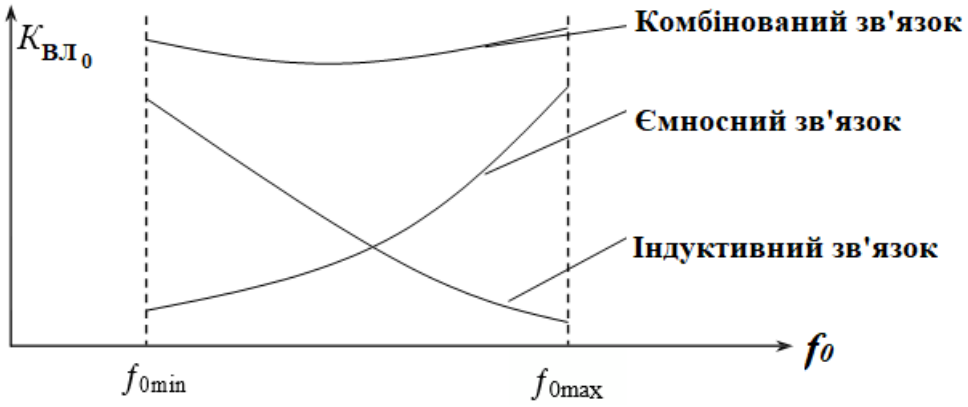


Рис.3.29 – Залежність коефіцієнту передачі ВЛ від частоти в робочому діапазоні частот

У тих випадках, коли потрібно забезпечити малу нерівномірність коефіцієнта передачі в діапазоні робочих частот ($f_{0min}…f_{0max}$), використовують комбінований зв'язок вхідного контуру з антеною (рис.3.27г). В цій схемі енергія з антени у вхідний контур передається не тільки через магнітний зв'язок між котушкою зв'язку і котушкою контуру, але і через ємність зв'язку. Зменшення коефіцієнта передачі в кінці діапазону за рахунок індуктивного зв'язку буде компенсуватися його зростанням за рахунок ємнісного зв'язку. При досить ретельному налаштуванні схеми можна отримати практично постійний у всьому робочому діапазону коефіцієнт передачі.

В метровому діапазоні узгодження ВЛ з антеною та входом ПРЧ може здійснюватися автотрансформаторним включенням коаксіального фідера антени та входу ПРЧ в контур ВЛ (рис.3.30).

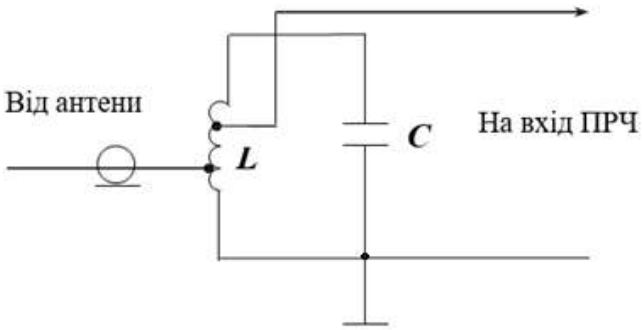


Рис. 3.30 – Приклад ВЛ приймача метрового діапазону

В дециметровому діапазоні в якості фільтруючих ланцюгів ВЛ використовуються короткозамкнені відрізки коаксіальних ліній довжиною $\lambda/4$. Розімкнутий кінець коаксиалу легко узгоджується із входом ПРЧ. Зв'язок контуру з коаксіальним фідером антени може бути автотрансформаторним, трансформаторним або ємнісним. При необхідності зв'язок з фідером може змінюватися.

Контрольні запитання і завдання

1. Яке призначення вхідних ланцюгів та вимоги до них?
2. По яким ознакам класифікуються вхідні ланцюги?
3. Побудуйте схему одноконтурного вхідного ланцюга, який має *комбінований зв'язок* з антеною та *автотрансформаторний* зв'язок із ПРЧ.
4. Назвіть основні параметри ВЛ.
5. Чому перебудова вхідних ланцюгів у діапазоні частот здійснюється за допомогою зміни ємнісного параметру фільтруючого ланцюга?

6. Обґрунтуйте переваги та недоліки вхідних ланцюгів з ємнісним зв'язком.
7. Яким чином забезпечується рівномірність коефіцієнта передачі у діапазоні частот вхідних ланцюгів з індуктивним зв'язком?
8. В чому полягають особливості ВЛ приймачів для діапазонів метрових і дециметрових хвиль?

3.7. Підсилювачі радіочастоти

Підсилювачі радіочастоти (ПРЧ) *здійснюють підсилення радіосигналу на прийнятій частоті та виконують в приймачі наступні важливі функції:*

– забезпечують підсилення прийнятих радіосигналів при незначному додаванні власних шумів (для цього використовують каскади з малими власними шумами та можливо великим коефіцієнтом посилення по потужності);

– спільно з вхідними ланцюгами забезпечують вибірковість по побічним каналам прийому і захист ланцюга антени від проникнення сигналу власного гетеродину.

ПРЧ відносяться до класу *резонансних підсилювачів*, в яких навантаженням підсилювальних елементів є коливальні контури, які налаштовуються на фіксовану робочу частоту, або перебудовуються в певному діапазоні робочих частот приймача. Перебудова резонансних частот контурів найчастіше здійснюється зміною ємності конденсаторів коливальних контурів.

В якості підсилювальних приладів в ПРЧ використовують транзистори (біполярні та польові), лампи біжучої хвилі, тунельні та параметричні діоди тощо, схеми можуть бути одноконтурними або двоконтурними.

В ПРЧ застосовують в основному два варіанти включення підсилювального елемента:

– із загальним емітером і загальною базою в каскадах на біполярних транзисторах;

– із загальним витоком і загальним затвором у каскадах на польових транзисторах;

– із загальним катодом і загальною сіткою в лампових каскадах.

Підсилювачі із загальним емітером (витоком, катодом) в діапазонах метрових і декаметрових хвиль дозволяють отримати найбільше підсилення по потужності, а із загальною базою (затвором, сіткою) характеризуються

більшою стійкістю до самозбудження, тому часто використовуються в дециметровому і сантиметровому діапазонах хвиль.

Важливими характеристиками ПРЧ є:

– коефіцієнти підсилення по напрузі та потужності;
– коефіцієнт шуму;
– вибірковість;
– динамічний діапазон;
– спотворення сигналу тощо.

В КХ-діапазоні ПРЧ реалізують на біполярних і польових транзисторах з включенням транзисторів із загальним емітером (витоком), загальною базою (затвором) і каскодною схемою.

Серед однотранзисторних схем на біполярних транзисторах в ПРЧ на не дуже високих частотах найбільшого поширення набула схема з загальним емітером (рис.3.31), яка дозволяє отримати максимальне підсилення номінальної потужності при невеликому рівні власних шумів.

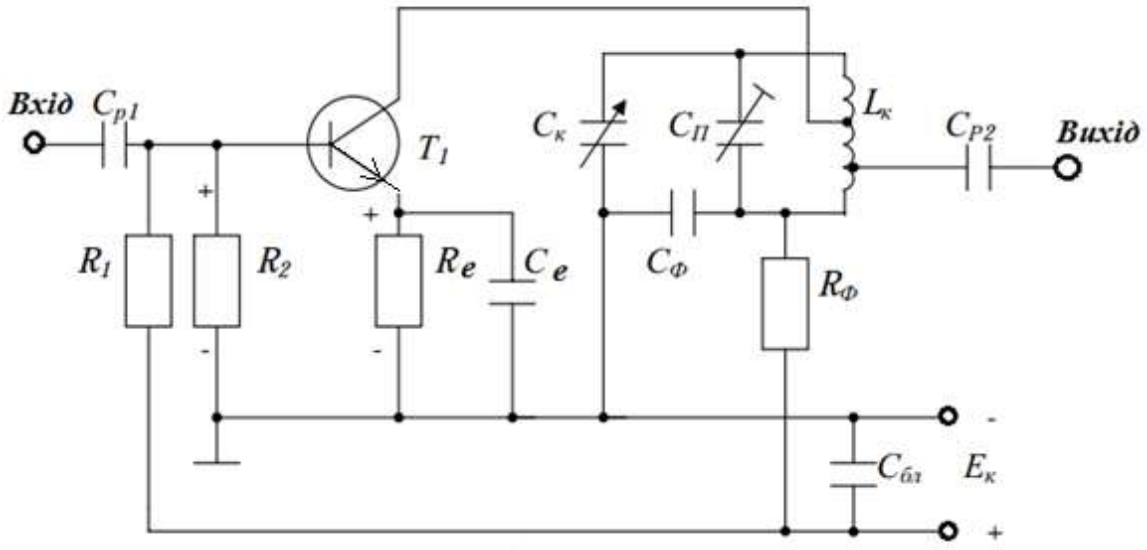


Рис. 3.31 – Приклад схеми однокаскадного ПРЧ на біполярному транзисторі з загальним емітером

Призначення елементів схеми:

– транзистор T_1 – підсилювальний прилад *n-p-n* типу;
– вихідний вибірковий ланцюг – коливальний контур $L_КC_КC_П$;
– C_{P1}, C_{P2} – роздільні ємності;
– R_1, R_2 – дільник колекторної напруги живлення $E_К$, що забезпечує постійний зсув на базі транзистора;

– R_E, C_E – забезпечують автоматичне зміщення на базі за рахунок постійної складової емітерного струму і стабілізують режим транзистора за постійним струмом;

– $C_Ф$, $R_Ф$ – усувають паразитний зв'язок між каскадами через спільне джерело живлення, чим підвищують стійкість підсилювачів з кількістю каскадів більше одного;

– $C_{БЛ}$ – блокує джерело живлення E_K по змінному струму, виконуючи аналогічну функцію $C_Ф$ та $R_Ф$.

Каскодна схема (з англ. "*CASCade to cathODE*") підсилювача складається з двох послідовно з'єднаних каскадів, при цьому навантаженням першого підсилювального приладу є вхідна провідність другого. В ПРЧ знайшли своє застосування наступні каскодні схеми:

– із загальним емітером - загальною базою (ЗЕ-ЗБ);

– із загальним витоком - загальним затвором (ЗВ-ЗЗ);

– із загальним витоком - загальною базою (ЗВ-ЗБ);

– із загальним витоком - загальним емітером (ЗВ-ЗЕ).

Поєднання польових і біполярних транзисторів в каскодній схемі (*ЗВ-ЗБ* та *ЗВ-ЗЕ)* забезпечує високе підсилення по потужності (польові транзистори забезпечують значне підсилення по току, а біполярні дозволяють отримати значне підсилення по напрузі) при роботі на досить високоомних навантаженнях.

Серед каскодних ПРЧ найкращими показниками володіють ПРЧ, які побудовані за схемами ЗЕ-ЗБ (рис.3.32) або ЗВ-ЗЗ, що аналогічні за своїми основними властивостями.

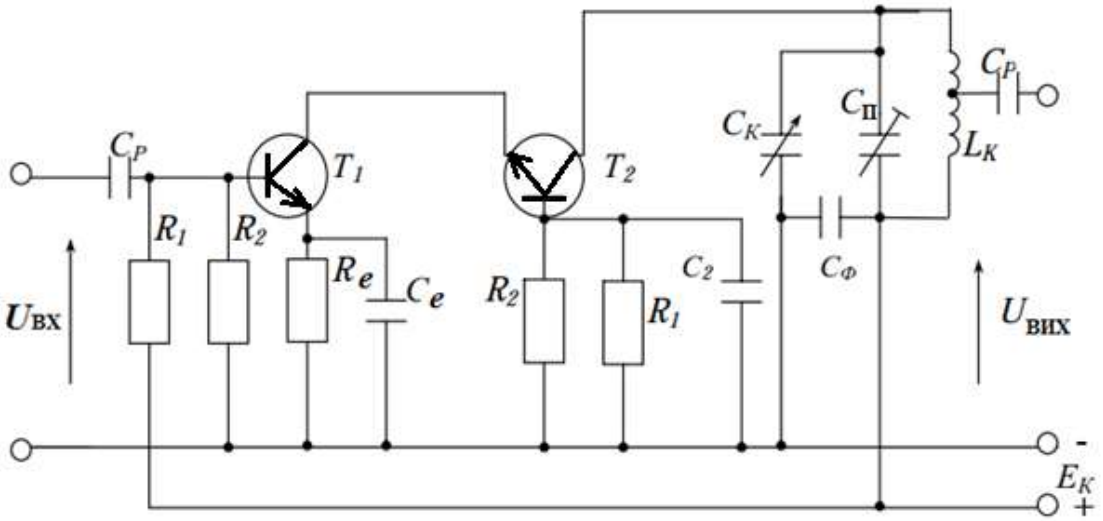


Рис. 3.32 – Приклад схеми каскодного ПРЧ із ЗЕ-ЗБ

В ПРЧ, що виконуються за інтегральною технологією, широко використовуються ***диференційні схеми***, які мають наступні важливі властивості:

– універсальність (на частотах 0…300 МГц вони здатні виконувати різні функції: підсилення, змішання, детектування, порівняння, обмеження, регулювання, комутації тощо);

– здатність підсилювати різницю напруг, що надходять на входи схеми і придушувати однакові по обом входів сигнали, що дозволяє забезпечити високу стабільність каскаду при дії дестабілізуючих факторів: зміні навколишньої температури і напруги живлення;

– малий паразитний зворотний зв'язок між виходом і входом, що дозволяє використовувати диференційні підсилювачі на високих частотах без нейтралізації паразитних зворотних зв'язків.

Диференційний підсилювач (ДП) складається з двох симетричних половин (рис. 3.33). Обидва транзистора спільно з резисторами в ланцюгах колекторів утворюють мостову схему, яка буде збалансована при ідентичності параметрів цих транзисторів і резисторів.

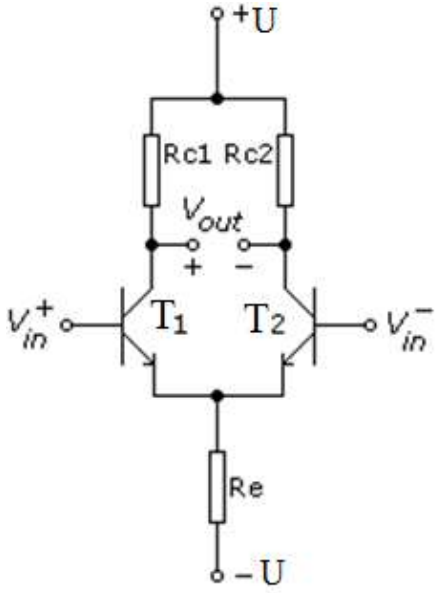


Рис.3.33. Диференційний підсилювач із симетричним виходом

При подачі на входи ДП $\boldsymbol{V_{in}}$ сигналів в протифазі напруги на входах транзисторів будуть рівні по амплітуді і протилежні по фазі. В результаті струм одного транзистора (наприклад, T_1) зросте, а струм іншого транзистора – зменшиться на ту ж величину. Таким чином, на колекторі T_1 напруга впаде, а на колекторі T_2 зросте. Внаслідок цього на виході ДП з'явиться різницева напруга, що пропорційна коефіцієнту підсилення будь-якої половини ДП.

При подачі синфазних сигналів на входи ДП V_{in} (такий сигнал може бути викликаний наведеннями, нестабільністю напруги живлення, зміною температури навколишнього середовища тощо) напруги на вході кожного транзистора будуть рівні не тільки по амплітуді, але й по фазі. В результаті зміни струмів транзисторів і потенціалів колекторів будуть однаковими, міст буде залишатися збалансованим, а вихідна різницева напруга буде залишатися рівною нулю. Отже, *ДП підсилює парафазні та придушує синфазні сигнали*.

Контрольні запитання

1. Яке призначення та основні функції ПРЧ?
2. Назвіть основні характеристики ПРЧ.
3. Які варіанти включення підсилювальних приладів застосовують в ПРЧ та які їх особливості?
4. В чому полягає особливість каскодних схем ПРЧ?
5. В чому переваги диференціальних підсилювачів для побудови ПРЧ радіоприймачів?

3.8. Тракти проміжних частот

Тракт проміжної частоти (ТПЧ) радіоприймача – *це частина радіоприймача, до складу якого входять перетворювач частоти (змішувач + гетеродин) і підсилювач проміжної частоти (ППрЧ).*

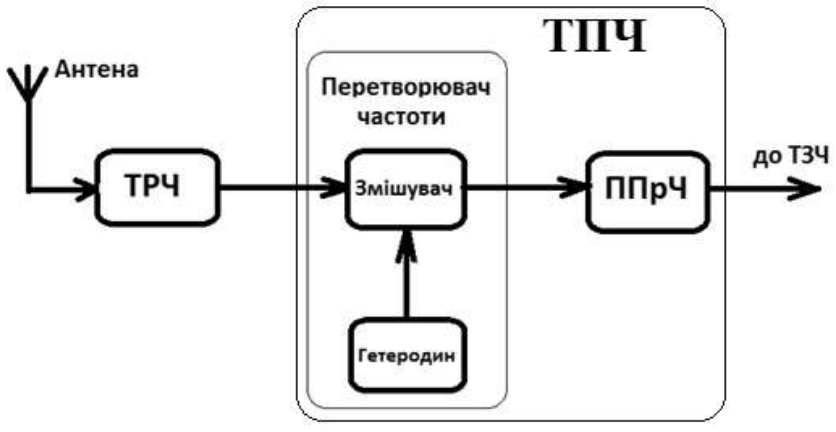


Рис.3.34 – Структура супергетеродинного приймача

В залежності від кількості перетворень частоти в приймачі таких трактів може бути декілька. В професійних радіоприймачах частіше всього використовується подвійне перетворення частоти і, відповідно,

використовують два тракти проміжних частот: тракт першої ПЧ і тракт другої ПЧ. Кожний з трактів в складі приймача виконує певні функції.

Тракт першої ПЧ забезпечує:

– перше перетворення частоти;

– вибірковість приймача по побічним каналам другого перетворення прийому, які обумовлені другим перетворенням частоти (по другому дзеркальному каналу і каналу другої ПЧ);

– підсилення сигналу на першій ПЧ (неосновне);

– розв'язку між першим і другим перетворювачами частоти.

Тракт другої (останньої) ПЧ забезпечує:

– друге перетворення частоти;

– вибірковість по сусіднім каналам;

– основне підсилення сигналу на другій ПЧ;

– формування загальної смуги пропускання приймача.

Виходячи з функцій, що виконуються трактом другої ПЧ, його називають трактом ***основної ПЧ***. В приймачах з одним перетворенням частоти тракт проміжної частоти виконує функції основного.

Тракт основної ПЧ зазвичай є багатокаскадним. Його проміжна частота вибирається достатньо низькою і сталою, що дозволяє реалізувати стійкий коефіцієнт підсилення (10^3...10^6) з коливальними системами високої добротності.

Перетворювачі частоти

Перетворювач частоти *супергетеродинного радіоприймача здійснює функцію переміщення (транспозиції) спектру сигналу з однієї області частот (f_H) в іншу ($f_{ПР}$).* Це переміщення відбувається в перетворювачі без значних порушень ширини спектра сигналу та зі збереженням характеру модуляції (рис.3.35).

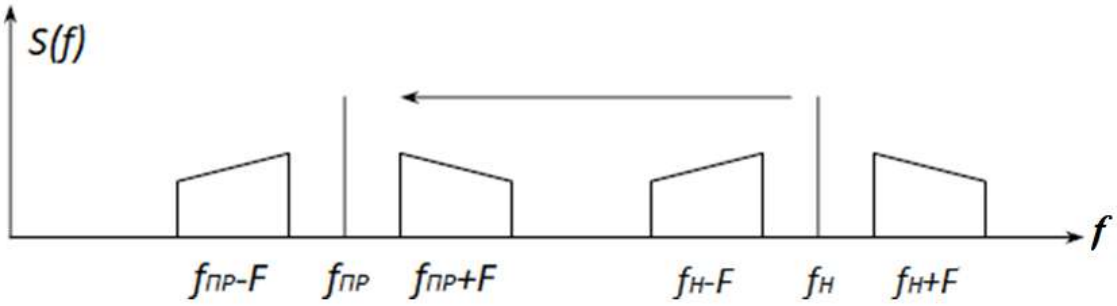


Рис.3.35 – Приклад перенесення спектру сигналу з АМ в перетворювачі частоти з f_H на $f_{пр}$

В приймачі спектр коливань сигналу переноситься з будь-якої ділянки робочого діапазону радіочастот в смугу пропускання підсилювача проміжної частоти за допомогою нелінійної ланцюга зі змінним коефіцієнтом передачі. Для зміни параметрів у ланцюг включають один або декілька елементів з нелінійними характеристиками і впливають на них змінною напругою гетеродину. В якості нелінійного елемента перетворювача використовуються переважно діоди або транзистори (в залежності від діапазону частот сигналу).

З точки зору підсилювальних та вибіркових властивостей перетворювач частоти може розглядатися як один із каскадів підсилювача проміжної частоти, електронні прилади якого працюють в режимі перетворення частоти та мають меншу крутизну характеристики передачі ніж для підсилення:

$$S_{\text{пер}} \approx 0{,}25 \bullet S_{\text{підс}}$$

Основними вимогами до перетворювачів частоти є наступні:

– висока лінійність характеристики перетворення частоти, послаблення або практично повна відсутність вищих компонентів перетворення частоти на виході;

– низький коефіцієнт шуму і по можливості максимальний коефіцієнт передачі по потужності (ця вимога особливо важлива для першого перетворювача частоти);

– мінімальне проникнення коливань гетеродину та його шумів як на вхід, так і на вихід перетворювача.

Послаблення інтенсивності вищих компонентів перетворення може бути досягнуто за рахунок наступних заходів:

– використанням нелінійного елемента перетворювача з лінійною і протяжною характеристикою перетворення;

– забезпеченням гармонічної форми напруги гетеродину з амплітудою, що не перебільшує половини лінійної дільники характеристики крутизни перетворення (Um гет ≈ 0,2...0,3 В);

– регулюванням підсилення в тракті радіочастоти забезпечити рівень напруги сигналу на вході перетворювача частоти значно меншим рівня напруги гетеродину, тобто $U_c << U_{гет}$;

– використанням балансних і кільцевих схем перетворювачів частоти на польових транзисторах або напівпровідникових діодах.

Основними характеристиками перетворювачів є:

– крутизна перетворення ($S_{\text{пер}}$);

– коефіцієнт перетворення: $K_{\text{пер}}=U_{m\text{Пч}}/U_{m\text{С}}$

– втрати перетворювача, під якими розуміється виражена в дБ величина, яка є зворотною коефіцієнту передачі по потужності в режимі узгодження по входу та виходу (зазвичай це 5...8 дБ):

$$L_{\text{пер}} = 10\, lg\, \frac{P_c}{P_{\text{пч}}}$$

– відносна шумова температура:

$$t_{пер} = \frac{T_{пер}}{T_0}$$

– коефіцієнт шуму тощо.

Режим роботи перетворювача вибирається з умов одержання мінімальних значень втрат перетворення і коефіцієнта шуму. Це досягається узгодженням перетворювача по входу і виходу та підбором оптимального зв'язку з гетеродином, що контролюється по постійному струму діода.

Перетворювачі частоти супергетеродинних приймачів складаються з перетворюючого нелінійного елемента, генератора високої частоти (гетеродину) і резонансної системи.

Струм на виході змішувача є складним і містить складові з частотами *основних коливань* $f_\Г$ та $f_\С$ і складові *комбінаційних частот* ($f_\Г + f_\С$) та ($f_\Г - f_\С$). Будь-яка з цих комбінаційних складових може бути використана в якості сигналу проміжної частоти.

В радіоприймальних пристроях доцільно зниження частоти вхідного сигналу, тому зазвичай використовується складова з різницевої частотою. Для виділення необхідних частотних складових смуговий фільтр на виході змішувача налаштовується на складову з частотою ($f_\Г - f_\С$).

Діодні перетворювачі частоти

В діодному перетворювачі частоти (рис. 3.36) джерело сигналу $U_\С$ і гетеродин $U_\Г$ включаються в ланцюг діода. У цьому ж ланцюзі формується напруга ($U_{\text{пч}}$) проміжної частоти ($f_{\text{пч}}$), яка виділяється резонансним контуром L_2C_2.

Коливальний контур L_1C_1 створює навантаження на частоті $f_\С$, а коливальний контур L_2C_2 – на проміжній частоті $f_{\text{Пч}}$. Для інших частот контури створюють нульове навантаження. Таким чином, на діод діє сумарна напруга $U_\Д = U_\С + U_\Г + U_{\text{Пч}}$.

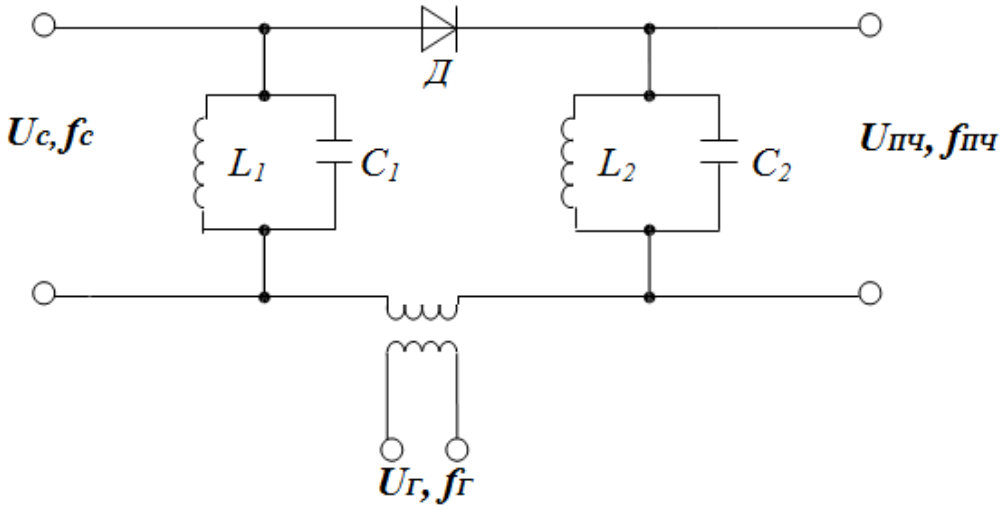


Рис. 3.36 – Діодний перетворювач частоти

Під дією сумарної напруги струм діода має складові постійного струму, гармонік гетеродину і сигналу, та комбінаційні складові (рис.3.37). Контур L_2C_2 виділяє напругу складової проміжної частоти $f_{ПЧ}=(f_Г - f_C)$.

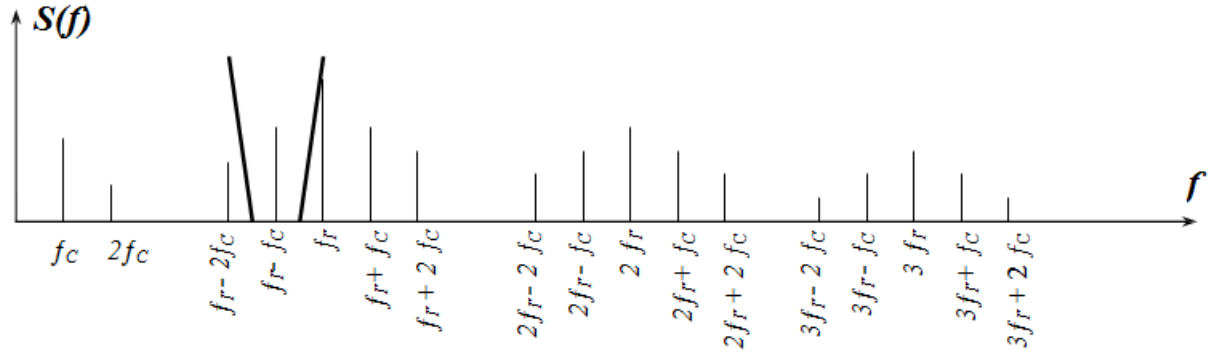


Рис. 3.37 – Частотні складові в струмі діоду

В простих схемах діодних перетворювачів частоти в складі струму діода дуже багато комбінаційних складових. При поганому узгодженні, недостатньої фільтрації, неточному виборі режиму роботи частина амплітуди складових струму діода може проходити на вихід, що спотворює сигнал проміжної частоти. У цьому полягає головний недолік простих діодних схеми перетворювачів частоти.

До складу схеми ***балансного перетворювача частоти*** (рис.3.38) входять наступні елементи:

– діоди $Д_1$ та $Д_2$ – нелінійні елементи;

– диференційні трансформатори T_{p1} та T_{p2} для узгодження джерела сигналу, фільтрів та гетеродину із схемою перетворювача;

– смуговий фільтр, що налаштований на проміжну частоту $f_{ПЧ}$ та є навантаженням перетворювача.

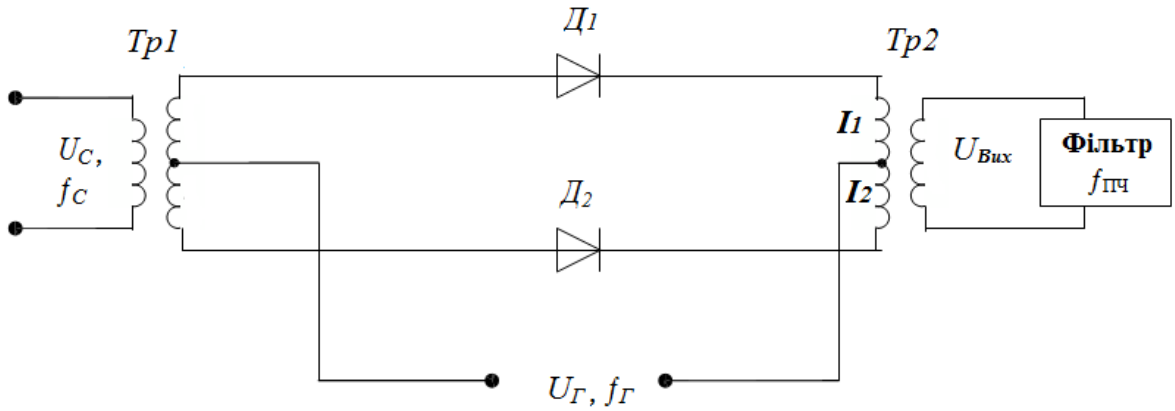


Рис.3.38 – Схема балансного діодного перетворювача частоти

Ця схема є симетричною щодо середніх точок трансформаторів, до яких підключений гетеродин, і утворює симетричний міст, що при повній симетрії схеми знаходиться в рівновазі (балансі).

В схемі балансного діодного перетворювача частоти напруга від гетеродину ($U_Г$) подається на діоди $Д_1$ і $Д_2$ *синфазно*, а напруга сигналу ($U_с$) подається через трансформатор Тр1 *протифазно*, тобто струм I_1 є сумою струмів сигналу і гетеродину, а струм I_2 є різницею цих сигналів. У первинній обмотці трансформатора Тр2 ці струми також протилежні, а вихідна напруга $U_{вих}$ трансформатора Тр2 є пропорційною їх різниці.

В спектрі вихідного сигналу відсутні гармоніки гетеродину ($kf_Г$), парні гармоніки сигналу ($2mf_С$) і комбінаційні складові гармонік гетеродине з парними гармоніками сигналу ($kf_Г \pm 2mf_С$). В цьому полягає *головна перевага балансної схеми* в порівнянні з простою діодною схемою. Крім того, балансна схема залишається працездатною навіть при виході з ладу одного діода (його пробої).

Схема перетворювача частоти, що зображена на рис.3.39 отримала назву ***кільцевої*** тому, що в ній діоди включені по кільцю. Тобто вона являє собою паралельне з'єднання двох балансних схем.

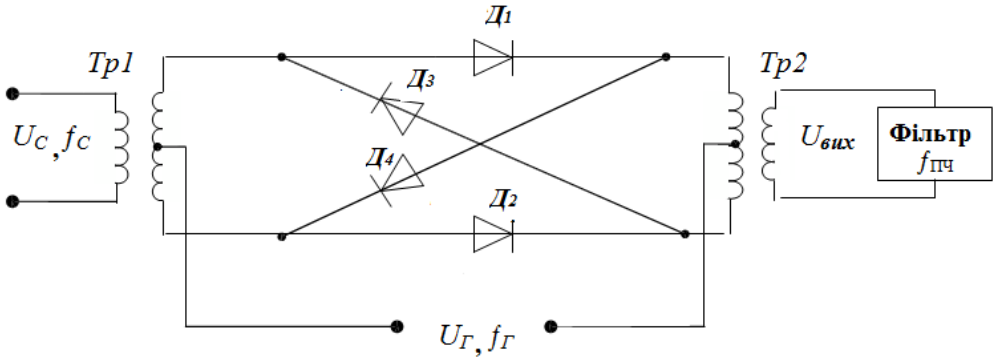


Рис.3.39 – Кільцевий діодний перетворювач частоти

В спектрі вихідного сигналу $U_{вих}$ кільцевого перетворювача присутні комбінаційні (різницеві і сумарні) складові частоти сигналу f_c і частоти гетеродину $f_Г$, а також комбінаційні (різницеві і сумарні) складають лише непарних гармонік частоти сигналу f_c і непарних гармонік частоти гетеродину $f_Г$. Це істотно полегшує придушення непотрібних компонентів результатів перетворення і виділення сигналу проміжної частоти.

Недоліком діодних перетворювачів частоти є їх низький коефіцієнт перетворення, який менше одиниці. Перетворювачі частоти на транзисторах (біполярних та польових) мають $K_{пер} > 1$.

Переваги перетворювачів на польових транзисторах в порівнянні з біполярними:

– перетворення буде лінійне з меншою кількістю комбінаційних складових;

– великий динамічний діапазон;

– низький рівень власних шумів, тому що польові транзистори працюють без вхідних струмів і, відповідно, мають великий вхідний опір (сотні кОм…одиниці МОм).

Підсилювачі проміжної частоти (ППрЧ)

Підсилювач проміжної частоти (ППрЧ) є резонансним (найчастіше багатокаскадним) підсилювачем, в середині смуги пропускання якого знаходиться значення проміжної частоти супергетеродинного приймача.

Резонансний підсилювач – це підсилювач, у якого в якості навантаження використовується коливальний контур.

ППрЧ входить до складу тракту проміжної частоти супергетеродинного приймача (рис. 3.40) та виконує дві важливі функції:

– забезпечує основне підсилення в приймачі до величини, необхідної для нормальної роботи детектора;

– забезпечує основну вибірковість по відношенню до сигналів по сусіднім каналам прийому.

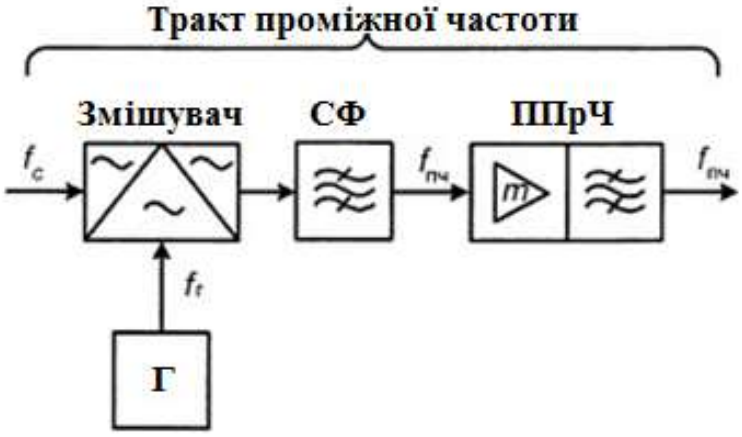


Рис.3.40 – Структура ТПЧ

ППрЧ відрізняються від підсилювачів радіочастоти тим, що підсилюють радіосигнали на постійній більш низькій частоті – на $f_{ПЧ}$. Внаслідок того, що ППрЧ повинні забезпечувати основне підсилення (коефіцієнт підсилення має порядок $10^3 \ldots 10^6$), вони реалізуються за допомогою багатокаскадних схем, охоплених системами автоматичного та/або ручного регулювання підсилення.

Для забезпечення високої вибірковості по сусідніх каналах прийому вибіркові системи ППрЧ повинні мати характеристику вибірковості близьку до прямокутної, що визначається крутизною скатів його амплітудно-частотної характеристики: чим вони крутіші, тим краще вибірковість. Якщо приймач розрахований для прийому сигналів з різною шириною спектра, то в тракті основної проміжної частоти реалізується регулювання смуги пропускання.

При побудові ППрЧ використовують дві базові структури:

– з рівномірним розподілом підсилення і вибірковості поміж каскадами (рис.3.41а);

– з розподілом функцій підсилення і вибірковості (рис.3.41б).

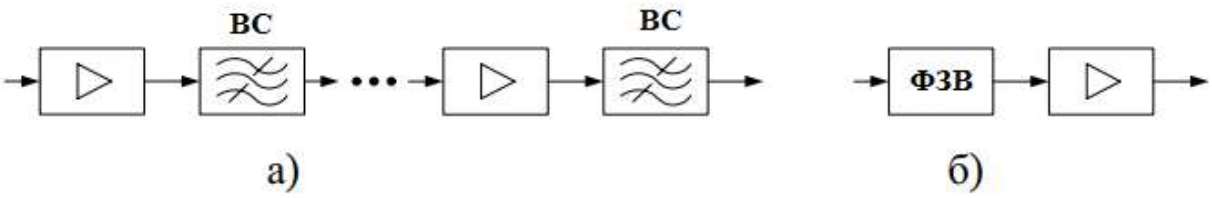


Рис.3.41 – Базові структури ППрЧ

В першій структурі (рис. 3.41а) кожний каскад має пристрій підсилення і вибіркову систему, яка реалізується простішими вибірковими ланцюгами – одно- або двоконтурними смуговими фільтрами. Для підсилення сигналу в широкій смузі частот використовують багатокаскадні ППрЧ, каскади яких поділяються на групи. Кожна група може містити два, три, чотири і більше одноконтурних каскадів, налаштованих на різні частоти спектра сигналу, що підсилюється (рис.3.42). Кількість підсилювачів ($П_n$) в групі визначається необхідною пропускною здатністю ППрЧ, а кількість груп – необхідним коефіцієнтом підсилення.

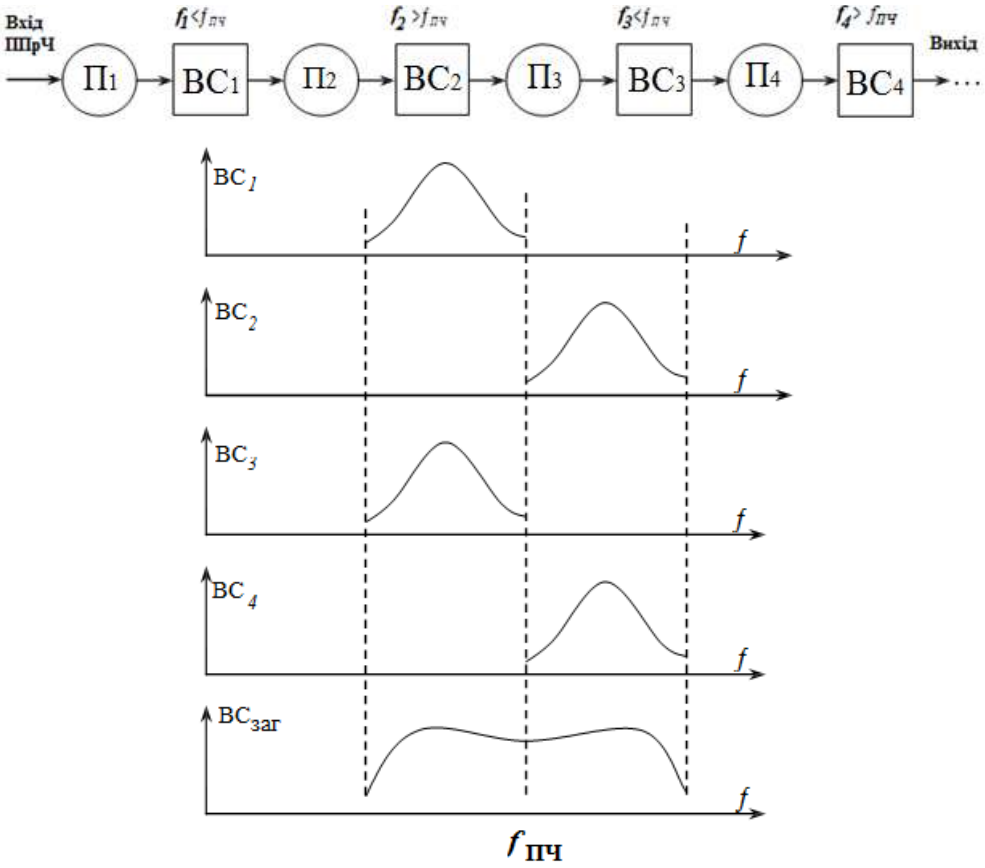


Рис.3.42 – Структура та АЧХ вибіркових систем ППрЧ на взаємно розлаштованих каскадах

До переваг таких ППрЧ можна віднести наступне:

– ідентичність каскадів;

– можливість реалізації потенційних підсилювальних властивостей внаслідок простого узгодження каскадів.

Недоліками є:

– взаємний зв'язок підсилювальних і вибіркових функцій;

– добротність вибіркових систем не може бути високою тому, що до кожної підключається електронний елемент, який шунтує вибіркову систему.

Такий принцип побудови ППрЧ може використовуватися і при малому числі каскадів (наприклад, в трактах неосновної ПЧ). Найпростішим прикладом таких схем є ППрЧ з одиночними налаштованими контурами, в яких використовується ланцюгове включення ідентичних каскадів (рис.3.43) на біполярних або польових транзисторах з трансформаторним або автотрансформаторним зв'язком.

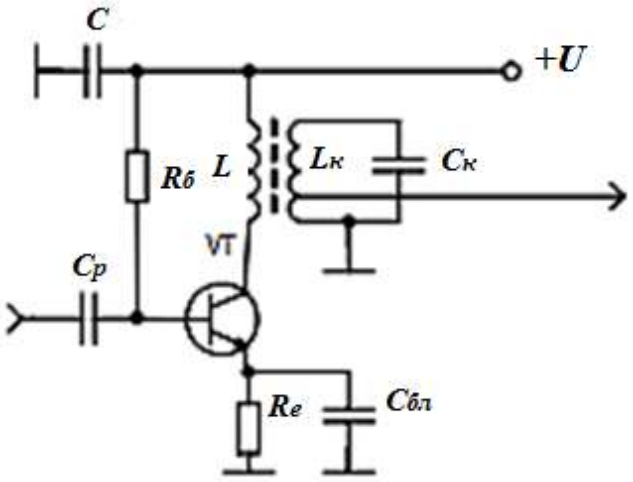


Рис.3.43 – Приклад каскаду ППрЧ з одноконтурним смуговим фільтром

В ППрЧ з розподілом функцій підсилення і вибірковості (рис.3.41б) основна вибірковість забезпечується фільтром *зосередженої вибірковості* (ФЗВ), який є навантаженням перетворювача частоти та реалізується на основі складних вибіркових систем. ФЗВ розміщуються в приймачах між перетворювачем частоти та першим каскадом ППрЧ. Причому решта каскадів ППрЧ є аперіодичними (резистивним) або резонансними, але з навантаженням зі слабкими вибірковими властивостями.

В якості ФЗВ використовуються смугові фільтри на основі різних високо добротних резонаторів:

- електромеханічних;
- п'єзокерамічних;
- об'ємних;
- багатокаскадних *LC*;
- кварцових;
- на поверхневих акустичних хвилях тощо.

Вибір проміжних частот

Вибір кількості перетворень частоти і номіналів проміжних частот визначаються рядом факторів, частина яких *взаємно суперечать*. Тому основною задачею, яка вирішується в процесі синтезу ТПЧ приймача є вибір таких номіналів проміжних частот, які б задовольнили вимогам цих факторів.

По-перше слід виходити з можливостей побудови ТПЧ з одним перетворенням, але при цьому слід врахувати наступне:

– номінальне значення проміжних частот не повинно знаходитися в межах діапазону робочих частот приймача і потужних радіостанцій;

– проміжна частота повинна бути можливо високою з наступних міркувань:

– найбільшого розлаштування сигналу і завади по дзеркальному каналу;

– кращої фільтрації напруги проміжної частоти на виході детектора: $f_{пч} \geq (5…10)F_{макс}$, де $F_{макс}$ – верхня частота спектру первинного сигналу;

– кращого відтворення форми імпульсних сигналів: $f_{пч} \geq (10…20)/\tau_{імпульсів}$

– проміжна частота повинна бути можливо нижчою з наступних міркувань:

– реалізації коливальних систем з можливо більшою добротністю;

– одержання високого стійкого коефіцієнта підсилення каскадів ПРЧ і меншої залежності підсилення від розходження параметрів електронних приладів і зміни параметрів елементів при дії навколишнього середовища схеми ПРЧ.

У випадку, коли ці умови не можливо виконати одночасно, потрібно використовувати подвійне перетворення частоти!

Стандартні проміжні частоти

Так як потужний сигнал з частотою рівною або близькою до проміжної частоти може проникати через вхідні ланцюги радіоприймача в тракт підсилення ПЧ, створюючи завади прийому, міжнародними угодами для ПЧ обрані стандартні частоти, які заборонено використовувати для зв'язку та інших цілей.

Для радіозв'язку і радіомовлення з амплітудною модуляцією (АМ) ПЧ вибирається з ряду наступних частот:

– 110 кГц; 215 кГц – в спеціальних довгохвильових зв'язкових приймачах;

– 450 кГц; 455 кГц; 460 кГц; 465 кГц; 467 кГц; 470 кГц; 475 кГц; 480 кГц – в побутових радіоприймачах і професійній апаратурі зв'язку.

Для радіомовлення з частотною модуляцією (ЧМ, FM): 262 кГц; 455 кГц; 1,6 МГц; 5,5 МГц; 10,7 МГц; 10,8 МГц; 11,2 МГц; 11,7 МГц; 11,8 МГц; 21,4 МГц; 75 МГц і 98 МГц.

В супергетеродинних приймачах з подвійним перетворенням частоти часто використовується перша проміжна частота 10,7 МГц, а друга – 470 кГц. Сучасні аматорські радіостанції з цифровою обробкою сигналу за допомогою цифрових сигнальних процесорів (*DSP*) використовують ПЧ на частоті 128 кГц при прийомі ЧМ сигналів.

В телевізійних приймачах аналогового телебачення:

– в системі *PAL* – 41,25 МГц (канал звуку), 45,75 МГц (канал зображення);

– в системі *SECAM* – 31,5 МГЦ (канал звуку) 38 МГц (канал зображення).

Безпроводове вимірювальне обладнання: 310,7 МГц; 160 МГц; 21,4 МГц.

Контрольні запитання

1. Який склад та призначення елементів тракту проміжної частоти?
2. Який тракт називається трактом основної ПЧ та яке його призначення?
3. Які функції виконує перетворювач частоти та які особливості його побудови?
4. Яке призначення та особливості базових структур реалізації підсилювачів проміжної частоти?
5. За якими умовами визначається проміжна частота приймача і чому?

3.9. Індивідуальні тракти приймання сигналів

В індивідуальних (часткових) трактах приймання відбувається обробка прийнятих радіосигналів з метою виділення з них первинного сигналу про інформацію, що передавалась. Цей процес прийнято називати *детектуванням (демодуляцією*).

Детектор *– це елемент радіоприймального пристрою, в якому здійснюється перетворення вхідного високочастотного модульованого радіосигналу або сигналу проміжної частоти в низькочастотний сигнал (струм або напругу), що змінюється за законом первинного низькочастотного модулюючого сигналу.*

В залежності вид виду модуляції розрізняють амплітудні, частотні та фазові детектори.

Особливості трактів приймання безперервних сигналів

Амплітудні детектори

Амплітудно-модульоване коливання (АМК) (рис. 3.44) є складним коливанням, яке при модуляції одним тоном (*F*) в своєму складі має три

складових: з частотою несівного коливання ($f_н$), з комбінаційними частотами ($f_н + F$) та ($f_н - F$).

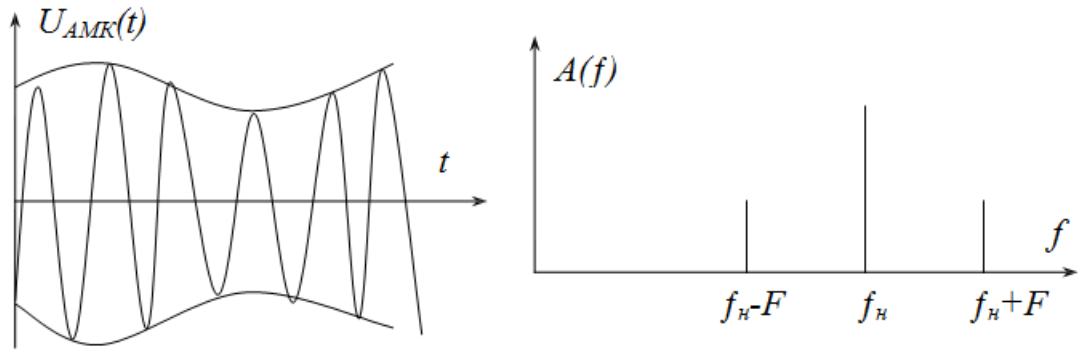


Рис. 3.44 – Форма та спектр АМ коливання при модуляції одним тоном із частотою F

Для отримання із спектру АМК складової з частотою F, необхідно за допомогою нелінійного елемента (НЕ) з односторонньою провідністю (наприклад, діода) здійснити перетворення сигналу, що перетворюється в імпульсний високочастотний сигнал з огинаючою амплітуди, яка пропорційна модулюючому сигналу та може бути виділена за допомогою фільтра нижніх частот (ФНЧ) (рис.3.45).

Рис.3.45 – Структура амплітудного детектора

Підсилювач звукової частоти (ПЗЧ) призначений для підсилення потужності сигналу звукової частоти до величини, необхідної для роботи кінцевого пристрою (телефонів, гучномовця).

Існують дві схеми амплітудних детекторів: послідовна та паралельна.

В послідовній схемі (рис.3.46) всі елементи (джерело АМК, НЕ, ФНЧ та навантаження) з’єднані послідовно.

Такі схеми застосовуються при відсутності у вхідному сигналі постійної складової, яка може змінювати режим роботи діода.

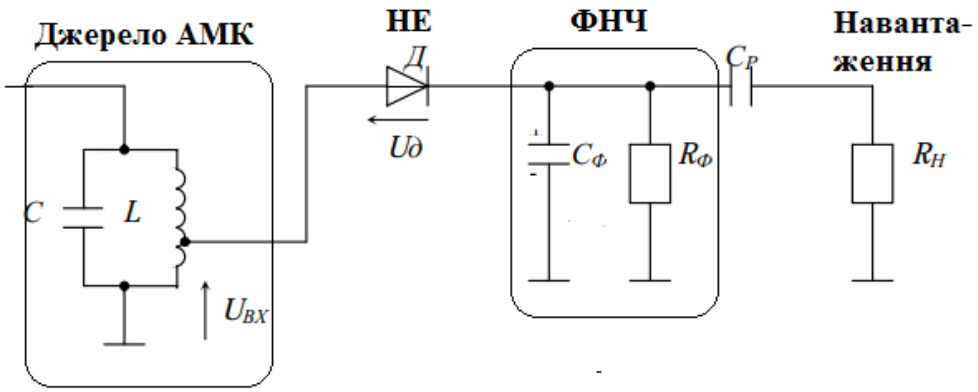


Рис.3.46 – Приклад послідовної схеми амплітудного детектора

В паралельних схемах джерело сигналу, НЕ, ФНЧ та навантаження підключаються паралельно (рис.3.47).

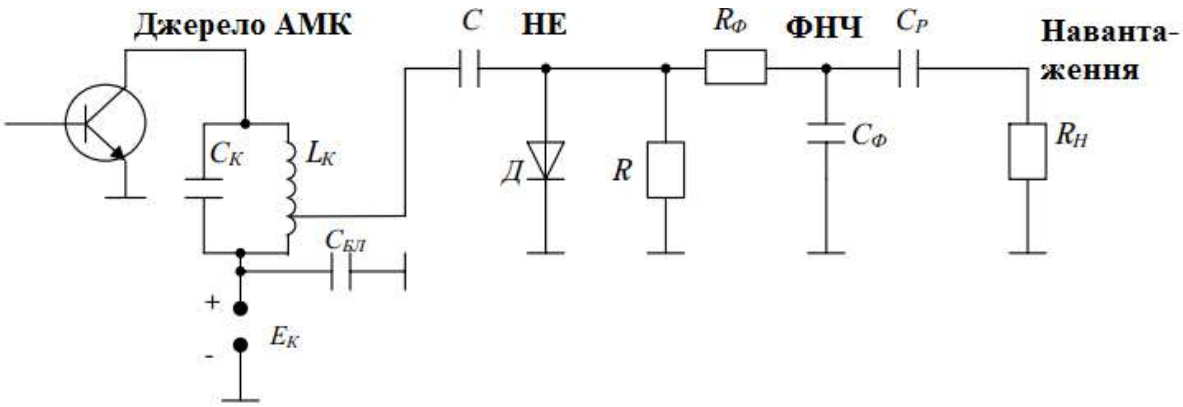


Рис.3.47 – Приклад паралельної схеми амплітудного детектора

Паралельна схема застосовується в разі наявності у вхідному сигналі постійної складової, вплив якої на режим роботи діода усувається відповідним включенням ємності *C*.

Основні вимоги до характеристик тракту прийому сигналів з АМ:

– смуга пропускання загального тракту прийому (ЗТП):

$$\Delta F_{\text{ЗТП}} = 2F_{\text{макс}} + 2\Delta f_{\text{рл}},$$

де $F_{\text{макс}}$ – верхня частота первинного сигналу,

$\Delta f_{\text{рл}}$ – нестабільність частоти радіолінії;

– смуга пропускання тракту звукової частоти:

$$\Delta F_{\text{ТЗЧ}} \approx F_{\text{макс}};$$

– коефіцієнт підсилення ЗТП:

$$K_{\text{ЗТП}} = U_{m\,\text{дет}} \cdot K_{\text{зап}} / (E_{A\,0} \cdot \sqrt{2}),$$

де $U_{m\,\text{дет}} = 0{,}5\ldots1$ В – амплітуда сигналу на вході детектора,

$K_{\text{зап}} = 10\ldots20$ – коефіцієнт запасу підсилення,

$E_{A\,0}$ – задана чутливість приймача.

Відомо, що АМ є найменш завадостійкою в порівнянні з іншими видами модуляції, а *узагальнений виграш* виду модуляції при АМ визначається наступною формулою:

$$q_{\text{АМ}} = m^2/(1+ m^2) \approx m^2,$$

який завжди значно менше 1, тобто має місце не виграш, а програш.

Сигнали з *односмуговою модуляцією* являють собою коливання, спектр яких має одну бічну смугу спектра АМК (верхню або нижню). Для виділення складової з частотою F необхідно зробити перенесення спектру односмугового сигналу з області несівних частот в область низьких частот (рис. 3.48), тобто здійснити перетворення «вниз» частоти односмугового сигналу за допомогою опорного коливання, частота якого дорівнює несівній частоті ($f_{\text{оп}}=f_{\text{н}}$). Для цього можуть використовувати, наприклад, кільцеві перетворювачі частоти (рис.3.49).

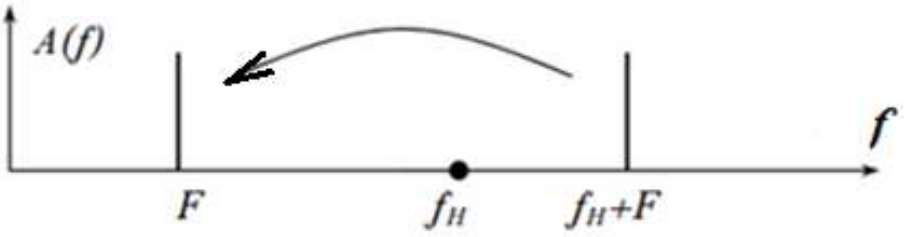


Рис.3.48 – Перенесення по частоті ОМ-сигналів

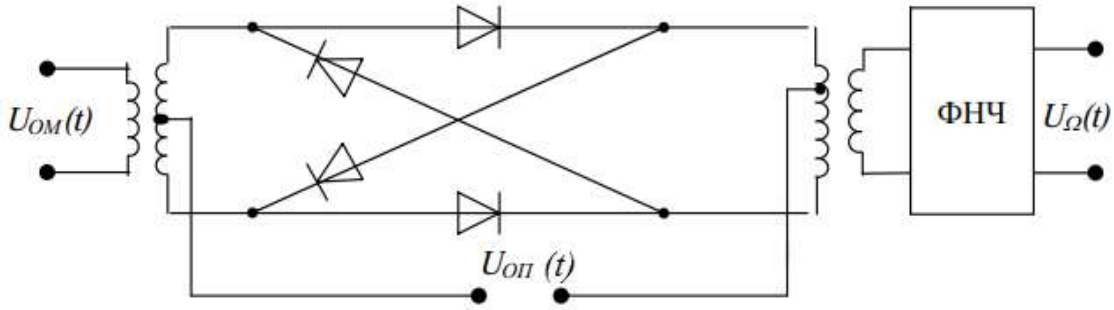


Рис. 3.49 – Кільцевий перетворювач частоти
для демодуляції сигналів з ОМ

Застосування кільцевої схеми обумовлюється тим, що на виході перетворювача буде менше комбінаційних складових, що покращує лінійність перетворення.

При детектуванні односмугових сигналів важливо, щоб частота опорного коливання $f_{\text{ОП}}$ якомога точніше збігалася з частотою несівного коливання $f_н$. Розбіжність $f_{\text{ОП}}$ і $f_{\text{н}}$ на величину Δf призводить до зміщення спектру первинного сигналу також на величину Δf:

$$(F\text{н} + F) - (f\text{ н} \pm \Delta f) = F \pm \Delta f$$

Наслідком цього є викривлення повідомлення. Величину Δf називають помилкою у відновленні несівного коливання або ***асинхронізмом***. Для якісної телефонної радіозв'язку допускається Δf<10 Гц.

Приймачі сигналів з ОМ відрізняються в основному способом відновлення несівної частоти (з використанням пілот-сигналу або без нього). Особливістю тракту прийому сигналів з ОМ є наявність фільтра ОМ сигналів, до якого пред'являються високі вимоги щодо вибірковості (коефіцієнт прямокутності фільтра повинен мати $K_{П(60дБ)} \leq 1{,}2\ldots1{,}3$).

Узагальнений виграш прийому сигналів з ОМ складає: $q_{ОМ} = 1$. Це пояснюється тим, що смуги пропускання тракту прийому до демодулятора і після нього однакові і спряжені зі спектром сигналу ($\Delta F_{ОМ} \approx F_{макс}$), а демодулятор являє собою лінійну систему.

Частотні детектори

В професійних системах радіозв'язку сигнали з частотною модуляцією використовуються для передачі телефонних (мовних) повідомлень в УКХ-діапазоні. На один радіоканал виділяється смуга 25 кГц або 12,5 кГц.

Загальний тракт приймання (ЗТП) приймача має звичайну структуру (рис.3.50), але потребує більш широку смугу пропускання та специфічні вимоги до амплітудно-частотної та фазо-частотної характеристик.

Рис.3.50 – Структура приймача ЧМ сигналів

Фільтр зосередженої вибірковості (ФЗВ) забезпечує основну вибірковість приймача по сусідніх каналах прийому. Підсилювач проміжної частоти (ППрЧ) забезпечує підсилення сигналу до рівня, який у 2…3 рази перебільшує поріг обмеження амплітудного обмежувача (АО), що призначений для усунення паразитної амплітудної модуляції радіосигналу. Частотний детектор – це нелінійний радіотехнічний пристрій, в якого напруга на виході змінюється пропорційно до зміни частоти ЧМ-коливань. Підсилювач звукової частоти (ПЗЧ) забезпечує підсилення і фільтрацію первинного сигналу.

Основні вимоги до тракту приймання приймачів ЧМ-сигналів:

– смуга пропускання приймача (при $m_{ЧМ} \approx 1$):

$$\Delta F_{ПРМ} = \Delta F_{С} + 2\Delta f_{РЛ} = 2F_{макс}(m_{ЧМ}+1)+2\Delta f_{РЛ},$$

де $F_{макс}$ – максимальна частота первинного сигналу, $m_{ЧМ}$ – індекс частотної модуляції, $\Delta f_{РЛ}$ – нестабільність радіолінії;

– коефіцієнт підсилення лінійного тракту приймача:

$$K_{ЛТр} = (2\ldots3)U_{A0} \bullet K_{зап}/(E_{A0}\sqrt{2}),$$

де U_{A0} – поріг обмеження АО, E_{A0} – чутливість приймача, $K_{зап}$=10…20 – коефіцієнт запасу підсилення;

Завадостійкість прийому ЧМ-сигналів визначається впливом завад на фазу сигналу та оцінюється узагальненим виграшом, який залежить від коефіцієнта модуляції:

– при дії синусоїдальної завади $q_{син}=m^2_{чм}$,

– при дії флуктуаційної завади $q_{фл}=3m^2_{чм}$,

– при дії імпульсної завади $q_{імп}=4m^2_{чм}$;

Чутливість приймача ЧМ-сигналів визначається, як відомо, наступною формулою:

$$E_{A_0}[\text{мкВ}] = \sqrt{4kT_0N_{Пр}\Delta F_{еф}R_A\gamma\xi} = \frac{\beta}{8}\sqrt{N_{Пр}\Delta F_{еф}[\text{кГц}]R_A[\text{кОм}]\xi}\,.$$

Для детектування безперервних сигналів з ЧМ найчастіше використовуються три типи частотних детекторів:

– диференційний детектор із зв'язаними і налаштованими в резонанс на проміжну частоту контурами;

– дробовий детектор (детектор відношення);

– диференційний детектор із розлаштованими контурами.

Всі три типи детекторів містять в своєму складі наступні пристрої (рис.3.51):

– перетворювач виду модуляції (ПВМ), що перетворює зміну частоти вхідного частотно-модульованого сигналу в пропорційну зміну амплітуди вихідного сигналу перетворювача;

– два однакових (зазвичай, діодних) амплітудних детектора (АД).

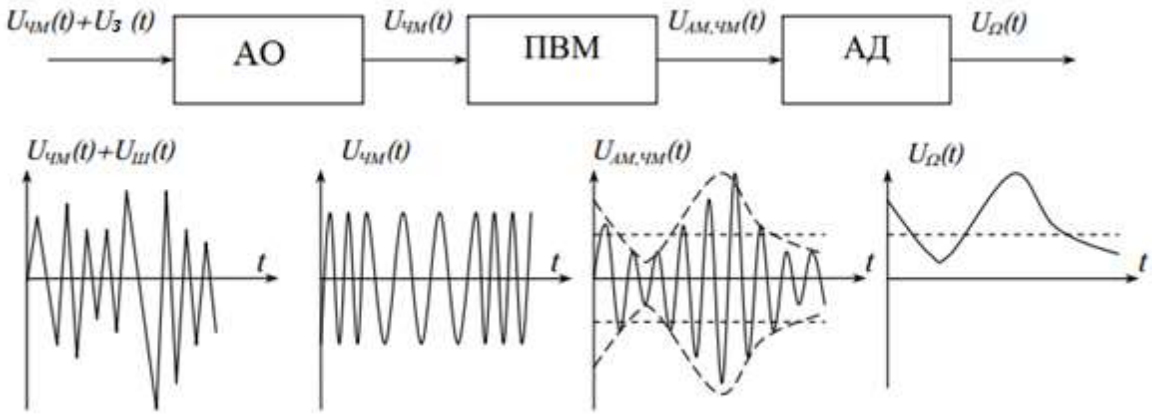


Рис.3.51 – Структура частотного детектора

Функцію амплітудного обмежувача може виконувати один із каскадів підсилення підсилювача проміжної частоти, що працює в режимі двостороннього обмеження амплітуди. В якості ПВМ можна використовувати, в найпростішому випадку, звичайний коливальний контур, амплітуда напруги в якому залежить від частоти поданого на нього сигналу. В результаті ЧМ-коливання перетворюється в амплітудно-частотно-модульоване коливання $U_{АМ\text{-}ЧМ}(t)$. На виході амплітудного детектора отримаємо первинний НЧ сигнал $U_Ω(t)$.

Особливості трактів приймання дискретних сигналів

Детектування радіосигналів амплітудної маніпуляції (телеграфії)

Розрізняють два методи приймання сигналів з АТ:

– гетеродинний;

– тонального генератора.

При *гетеродинному методі* (рис. 3.52) синусоїдальні коливання проміжної частоти при передачі струмових посилок за допомогою напруги гетеродину перетворюються в коливання звукової частоти.

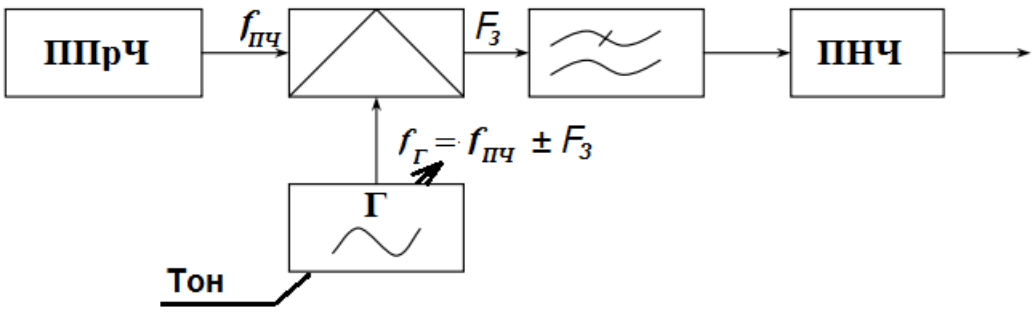


Рис.3.52 – Гетеродинний метод детектування

Для цього частота гетеродину ($f_Г$) встановлюється відмінною від проміжної частоти сигналу на величину звукової частоти ($F_З$). Змінюючи в невеликих межах частоту гетеродину, є можливість отримати частоту тону, що найбільш сприятлива для слухового сприйняття сигналу (частота тону для слухового прийому лежить в межах 750…1500 Гц) і забезпечити деяке ослаблення дії завад. Недоліком цього методу є наявність близько розташованого дзеркального каналу прийому (розлаштування по частоті складає всього 1,5…3 кГц).

При *методі тонального генератора* синусоїдальні коливання проміжної частоти при передачі струмових посилок модулюються напругою низької частоти тонального генератора з подальшим їх детектуванням амплітудним детектором (рис.3.53).

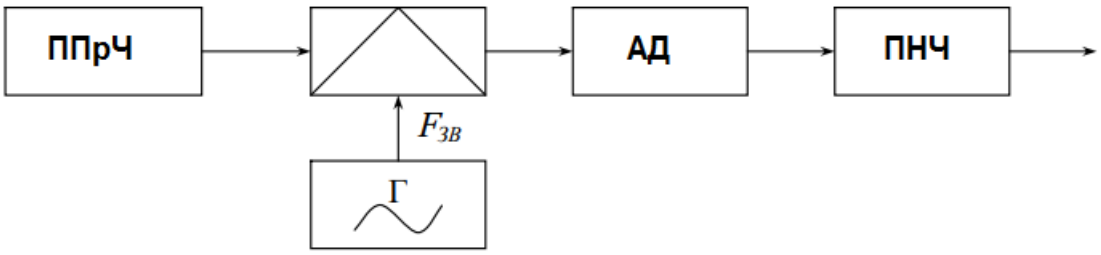


Рис.3.53 – Метод тонального генератора для детектування

Детектування радіосигналів частотної маніпуляції (телеграфії)

Для таких радіосигналів тракт прийому до демодулятора (рис.3.54) побудований за схемою **ШОВО** (**Ш**ирокосмуговий тракт -**О**бмежувач амплітуди - **В**узькосмуговий тракт - **О**бмежувач амплітуди). Функції широкосмугового тракту та першого обмежувача виконує загальний тракт прийому. Вузькосмуговий тракт реалізується *прохідним фільтром* (Ф) зі смугою пропускання, узгодженою зі спектром сигналу та високим коефіцієнтом прямокутності ($К_П \leq 2$), тому що він забезпечує вибірковість приймача по сусідніх каналах прийому. Прохідний фільтр остаточно придушує імпульсні завади і ослаблює завади, зосереджені за спектром. Амплітудний обмежувач (АО) вирівнює амплітуди радіоімпульсів натискання та відпускання, а тригер (Тг) формує вихідний сигнал, який необхідний для роботи кінцевого пристрою.

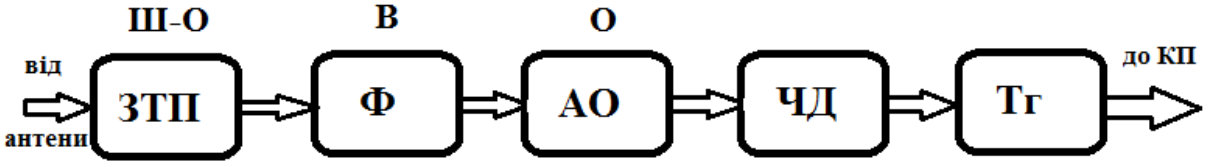


Рис.3.54 – Структура приймача сигналів ЧТ

Смуга пропускання загального тракту прийому $\Delta F_{ЗТП}$ в 3…4 рази більша за смугу пропускання прохідного фільтра.

Завдання частотного детектора полягає в перетворенні послідовності радіоімпульсів із двома різними частотами, наприклад, $f_Б$ і $f_В$, у відповідну послідовність відеоімпульсів, тобто – в посилки постійної напруги (струму) телеграфного сигналу. Наприклад, радіоімпульсу з частотою $f_Б$ може відповідати нульова посилка «0», радіоімпульсу з частотою $f_В$ – струмова посилка «1» (рис.3.55).

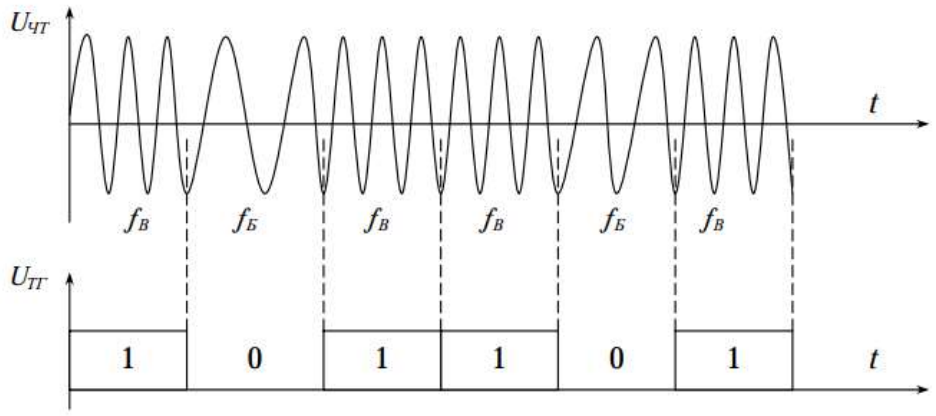


Рис.3.55 – Сигнал ЧТ та первинний сигнал

Для детектування сигналів ЧТ часто застосовується схема ЧД із взаємно розлаштованими контурами. Один контур налаштовується на частоту $f_В$, інший – на частоту $f_Б$.

Детектування радіосигналів відносно-фазової маніпуляції (телеграфії)

Детектування сигналу ВФТ здійснюється шляхом порівняння фази сигналу Uс (t) з фазою сигналу затриманого на час однієї елементарної посилки $U\tau(t)$ (рис. 3.56).

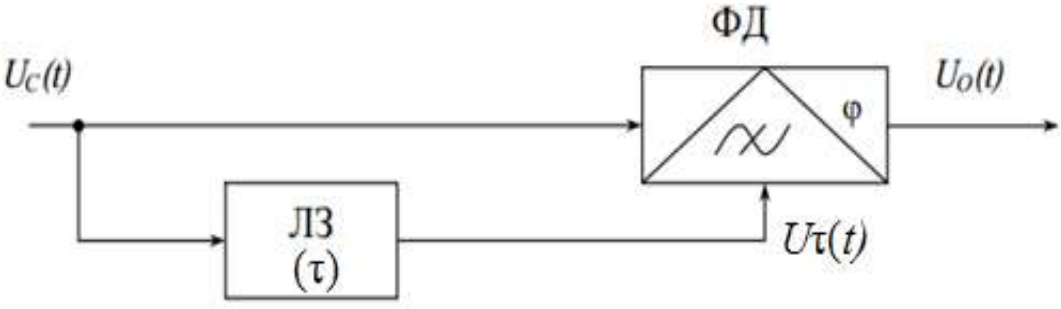


Рис.3.56 – Схема детектування сигналів ВФТ

Якщо фази сигналу (Uс) і затриманого на тривалість τ однієї елементарної посилки ($U\tau$) збігаються в тактовій точці, на виході ФД буде «1», якщо відрізняються на 180 ° – «0».

Фазовий детектор – це нелінійний радіотехнічний пристрій, в якому вихідна напруга змінюється пропорційно різниці фаз двох поданих на нього коливань.

Принцип роботи фазового детектора заснований на порівнянні фази сигналу (U_c) з фазою опорної допоміжної напруги ($U_{оп}$), частота якої дорівнює частоті несівної цього сигналу. В якості фазового детектора зазвичай використовується або балансна, або кільцева схеми перетворювача частоти (рис.3.57).

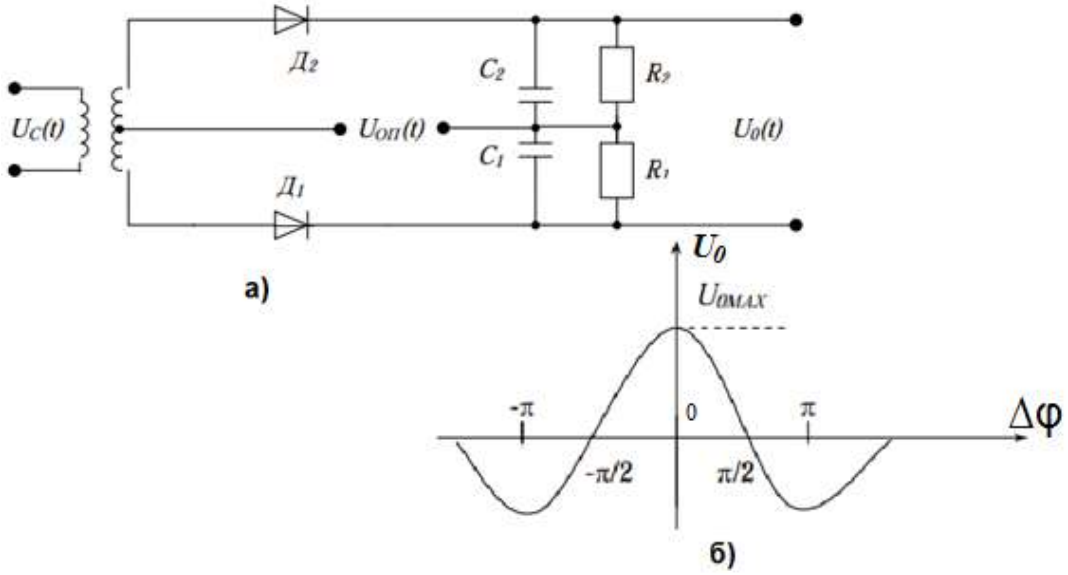


Рис.3.57 – Схема фазового детектора (а) та його детекторна характеристика

3.10. *SDR* - приймачі

За період від винаходу радіо до теперішнього часу зовнішній вигляд, структура та елементна база радіоприймачів істотно змінилася (рис.3.58).

Рис. 3.58 – Еволюція радіоприймачів

Дуже популярними стає застосування для радіообладнання так званих технологій ***SDR*** (англ.*Software-Defined Radio – програмно визначена радіосистема*), в яких програмне забезпечення використовується як для

модуляції (демодуляції) радіосигналів, так і для інших перетворень сигналів в передавачах/приймачах.

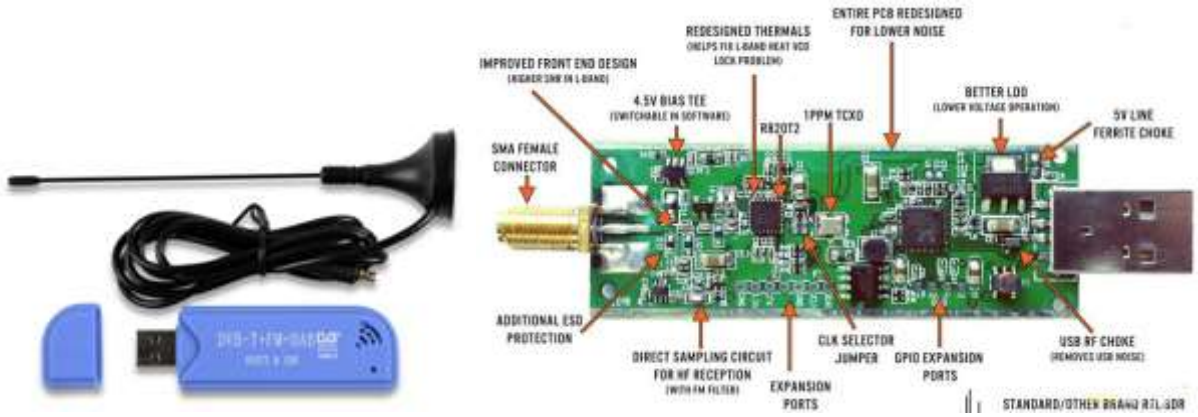
Метою такого підходу є створення систем, які можуть приймати і передавати практично будь-які радіосигнали за допомогою програмного забезпечення, що є гнучким та адаптивним. В режимі приймання технологія *SDR* може забезпечити більш високу ефективність, ніж при використанні традиційних аналогових методів, оскільки при цифровій обробці сигналів їх фільтрація близька до ідеальної. Крім того, за допомогою програмних алгоритмів можуть бути реалізовані такі функції, які дуже складно отримати при аналоговій обробці.

Ідея *SDR* полягає в наступному:

– відбувається передача широкосмугового сигналу (від десятків кГц до десятків МГц в залежності від можливостей ПК, в тому числі її звукової та відео-карти) з радіоприймача в комп'ютер для подальшої обробки;

– демодуляція сигналу – все те, що «звичайний» радіоприймач робить в «залізі» (демодулятори АМ, ЧМ, фільтри, кодери тощо) – в SDR реалізується в комп'ютері або в окремих пристроях математичними алгоритмами; при цьому потрібна лише частина традиційного приймача, яка безпосередньо приймає радіосигнал.

Історія застосування *SDR* починається давно, але перші версії відповідного програмного забезпечення датуються 2007 роком. Перші професійні рішення з’явилися в 2010 році – *Perseus SDR*-приймач з 14-бітним АЦП, частотним діапазоном 10 кГц…30 МГц і шириною смуги пропускання до 1,6 МГц. Наступним проривом в аматорській техніці радіозв’язку стала поява приймача (рис. 3.59) на чіпі *rtl-sdr (Realtek RTL2832U)*, який призначався для прийому програм цифрового телебачення (*DVB-T*), аналогового та цифрового радіомовлення (*FM* і *DAB*).



а) б)

Рис.3.59 – Зовнішній вигляд(а) і внутрішня плата(б) RTL-SDR-приймача

Радіозасоби з *SDR* поділяють на три групи:

1) застарілі моделі, які для обробки використовували звукову карту комп'ютера, а сигнал між пристроями передавався по аудіо кабелю;

2) мають вбудований АЦП і передають сигнали в смузі до 10 МГц в ПК у цифровому форматі через USB-інтерфейс, побудовані за принципом гетеродинного прийому (зберігається недолік супергетеродинного приймача – наявність дзеркального каналу прийому), тільки після перенесення частоти замість НЧ-блоку використовують цифрову обробку сигналів (англ. *DSP*);

3) пристрої з прямим цифровим перетворенням (рис. 3.61) – *DDC (Digital Down-Converter*) в тракті приймання та *DUC (Digital Up-Converter)* – в тракті передавання; приймач не має дзеркального каналу, основні перетворення здійснюються в *SDR*-пристрої, а ПК (PC) може використовуватися для керування та відображення результатів вимірів, існуючим недоліком (поки що) є обмеження верхньої робочої частоти радіозасобів можливостями АЦП/ЦАП.

Рис. 3.60 – Приклади *SDR*-приймачів

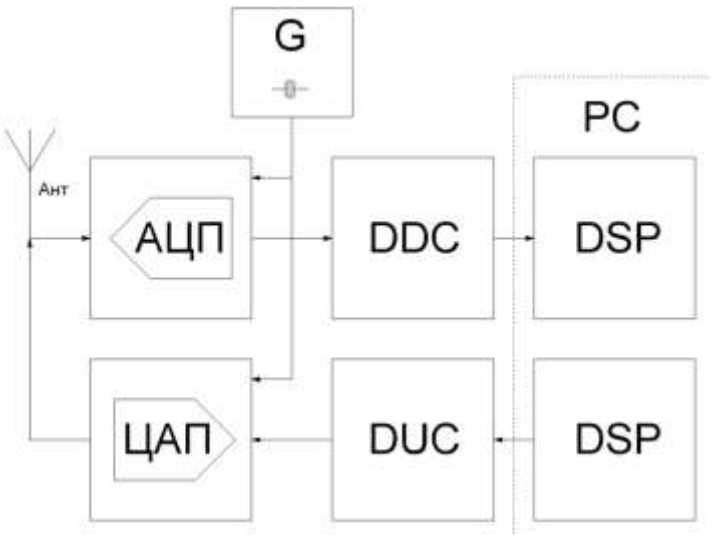


Рис. 3.61 – Архітектура радіозасобу з *DDC/DUC*
(тракти приймання і передавання)

Технологія *SDR* надає наступні сервіси користувачу:

– відображення панорами спектру радіоефіру в достатньо широкій смузі частот як в частотній так і часовій областях (рис.3.62);

– наявність цифрових фільтрів, які швидко перебудовуються, практично з ідеальними характеристиками;

– можливість проведення досить точних вимірювань (смуги випромінювання, частоти, рівня сигналу) із збереженням результатів;

– приймання (передавання) радіосигналів практично любої модуляції;

– широкосмугова обробка сигналів, в тому числі, запис та відтворення;

– використання стандартних декодерів (з можливістю додавання програмно будь-яких алгоритмів перетворення сигналів);

– дистанційне керування пристроями тощо.

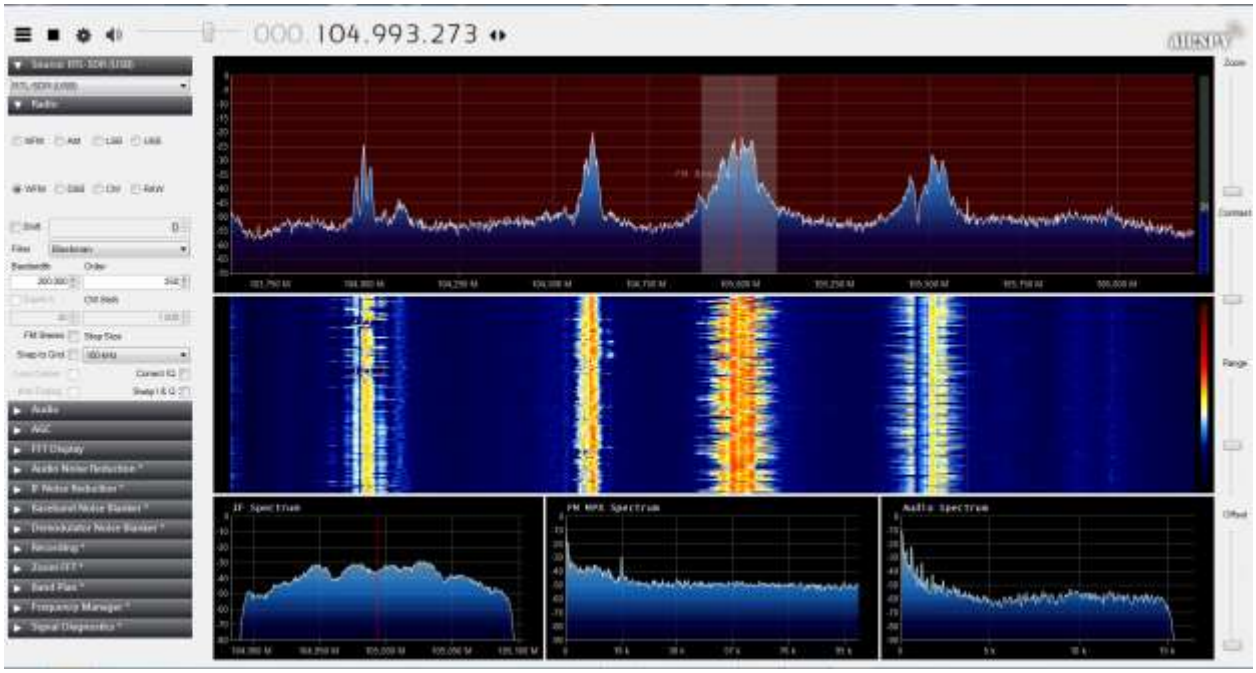


Рис.3.62 – Приклад спектральної панорами програмного забезпечення

SDR знаходить застосовування і у спеціальному зв’язку, де в режимі реального часу потрібна підтримка різноманітних радіопротоколів, що можуть змінюватися. Прикладом реалізації технології *SDR* у військовій сфері є проект програми Європейського Союзу ***ESSOR*** (англ. *European Secure Software-defined Radio*) щодо розробки програмно конфігурованих радіосистем телекомунікацій для забезпечення взаємосумісного захищеного зв'язку в тактичній ланці управління в діапазонах коротких і ультракоротких хвиль.

Контрольні запитання

1. Які вимоги до тракту прийому АМ-сигналів?
2. Чим поясняється низька завадостійкість приймачів сигналів АМ?
3. В чому полягають особливості слухового прийому сигналів АТ?
4. Що таке асинхронізм та які його наслідки при прийомі сигналів з односмуговою модуляцією?
5. Які вимоги до тракту прийому та які типи детекторів використовують при прийомі ЧМ-сигналів?
6. Який склад та принцип роботи частотного детектора?
7. Які методи прийому сигналів АТ застосовують та в чому полягає їх особливість?
8. В чому полягає особливість тракту прийому сигналів ЧТ?
9. Яким чином здійснюється детектування сигналів ВФТ?
10. В чому полягають сутність *SDR*-приймачів, їх переваги та додаткові сервіси для користувачів?

РОЗДІЛ 4. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ ТЕЛЕ- ТА РАДІОМОВЛЕННЯ

4.1. Системи аналогового звукового мовлення

Історія створення та класифікація систем мовлення

Відповідно до Резолюції *ITU-R* 4-3, затвердженої Асамблеєю Радіозв'язку у 2000 році (Стамбул), прийнято нове визначення *служб мовлення* в складі служб радіозв'язку, які тепер відносяться до компетенції Сектору Радіозв'язку Міжнародного Союзу Електрозв'язку (МСЕ-R) і в його складі – до нової Дослідної Комісії 6 "Служби мовлення (Наземні й супутникові)".

Відповідно до статті 1.38 Регламенту радіозв'язку ***радіомовна служба*** *– це служба радіозв'язку, передачі якої призначені для безпосереднього приймання населенням*. Ця служба може здійснювати передачу звуку, передачу телебачення або інші види передачі.

Це визначення охоплює *служби мовлення засобами радіозв'язку (наземними й супутниковими), включаючи телевізійні та інші відеослужби, служби звукового мовлення, мультимедійні служби, служби мовлення даних, інформація яких принципово призначена для масового розподілу* (рис.4.1).

Рис.4.1 – Класифікація систем мовлення

Телебачення *є видом аудіовізуальних застосувань, основне призначення яких – передавання відеосцен зі звуковим супроводом*. Подібні системи можуть реалізуватися на технологічній базі різних рівнів – від найпростіших аналогових до досконалих цифрових систем з високим ступенем інтелектуалізації. Системи можуть бути мовленнєвими або прикладними, монохромними або кольоровими, моноскопічними або стереоскопічними тощо. В них можуть сполучатися функції відтворення

зображень, звуку та виконання інших операцій, наприклад, у спеціалізованих прикладних системах – розпізнавання образів.

Звукове мовлення – *технологія передачі необмеженому числу слухачів мови, музики та інших звукових ефектів або звукової інформації в радіоефірі, в провідних мережах (провідне радіомовлення) або в мережах з пакетною комутацією (в комп'ютерних мережах – інтернет-радіо)*. В залежності від рівня застосованих технологій, звукове мовлення може реалізовуватися на різних рівнях – від звичайного вузькосмугового монофонічного аналогового звукового мовлення і до стереофонічного мовлення, в тому числі – і цифрового.

Логічним продовженням телевізійного і звукового мовлення є ***мультимедійне мовлення***, що *передбачає використання комп'ютерних технологій, причому аудіовізуальні сцени сполучать у собі натурні відео- і аудіосцени, відеоінформацію в графічному та векторному форматах, текстову інформацію, синтетичний звук*. Важливою відмітною рисою мультимедійного мовлення є також об'єктно-орієнтоване передавання інтерактивних аудіовізуальних сцен.

Подальшим кроком у розвитку мультимедійного мовлення є ***гіпермедійне мовлення***, в якому, *на додаток до мультимедійного мовлення, використовуються гіперпосилання, використання яких дозволяє будувати аудіовізуальні сцени за ієрархічним принципом*, так що на різних рівнях ієрархії сцени на різних рівнях можуть відтворюватися подробиці.

Одним з видів мовлення є також ***мовлення даних***. До цих систем належить системи «ТЕЛЕТЕКСТ», *RDS (Radio Data* System), *SCA (Subcarier Communication Allocation), ARI (Autofahrer Rundfunk Information*) тощо.

Зараз з’являється багато нових технологій і платформ для масової трансляції відео, наприклад, ***відеостримінговий сервіс*** (англ. *Video streaming service*) – платформа, що забезпечує потокову трансляцію різних подій в режимі реального часу.

В мовленні використовується розподіл інформації від точкового джерела в усі боки на масово доступні приймачі користувачів. Якщо необхідний ресурс зворотного каналу (для керування доступом, інтерактивністю тощо), то у мовленні, як правило, використовується несиметрична розподільна структура, яка припускає масовий розподіл інформації по каналу з великою пропускною здатністю і передавання інформації убік провайдера послуг з меншою пропускною здатністю. Для виробництва та розподілу програм (телевізійних, звукових, мультимедійних, даних тощо) можуть знадобитися мережі обміну програмним матеріалом між

студіями, мережі забезпечення збирання матеріалу (ENG – електронного збирання новин, SNG – супутникового збирання новин тощо), первинного розподілу до вузлів локального розподілу, вторинного розподілу на приймачі користувачів.

Організації, що займаються стандартизацією в галузі мовлення

Існує багато організацій, що займаються стандартизацією мовлення. Однієї з найбільш важливих організацій є ***ITU*-R** (*Radiocommunication Sector of the ITU*). В *ITU-R* телебаченням займається, насамперед, Дослідницькі Комісії 11. Цей орган випускає найважливіші документи, а саме Рекомендації та Звіти. Документи *ITU-R*, що стосуються мовного телебачення, мають префікс "*BT*" (абревіатура від слів *Broadcast Television*).

ITU-T (*ITU Telecommunication Standardisation Sector*) також є постійним органом МСЕ. Він займається питаннями технології, експлуатації та тарифікації і публікує власні Рекомендації, які використовуються в усьому світі. Служби телевізійного, звукового, мультимедійного, гіпермедійного мовлення і мовлення даних на основі кабельних систем і мікрохвильових мереж, інтегрованих із широкосмуговими інформаційними мережами і службами є предметом компетенції Дослідної Комісії 9 Сектору Стандартизації Міжнародного Союзу Електрозв'язку (МСЕ-Т).

Міжнародна Організація по Стандартизації (***ISO*** – *International Organisation on Standardisation*) займається в основному стандартизацією параметрів апаратури. Через свої Комісії, такі як – Міжнародна Електротехнічна Комісія (*IEC*), Міжнародна Світлотехнічна Комісія (*CIE*), ця організація випускає Публікації, що містять, наприклад, докладний опис процесів перетворення сигналів в різній апаратурі тощо.

На регіональному рівні (європейському, американському, азіатському) стандартизацією займаються міжнародні союзи віщання. Зокрема, Європейська Спілка Мовлення (***EBU*** – *European Broadcasting Union*) випускає власні Технічні Рекомендації, які фактично обов'язкові для його членів. Створений спочатку для країн Західної Європи, цей союз у січні 1993 року об'єднався зі східно-європейською Міжнародною Організацією по Телебаченню і Радіомовленню (***OIRT*** – *International Radio and Television Organisation*) і зараз представляє більшість провідних віщальних організацій Європи. *EBU* співробітничає з Європейським Інститутом Стандартизації Електрозв'язку (***ETSI***), що випускають Європейські Стандарти по Електрозв'язку (*European Telecommunication Standards*).

Спілка інженерів кіно та телебачення (***SMPTE*** – *Society of Motion Pictures and Television Engineer*s) була спочатку північноамериканським, але потім перетворилася у міжнародну організацію, в якій унікальним образом об'єднані віщальні компанії, які виготовляють апаратуру, вчені-дослідники та вчені-педагоги. Ця організація також випускає свої Рекомендації, Стандарти й Технічні Керівництва.

Крім того існують національні урядові організації, такі як Федеральна Комісія Зв'язку США (***FCC*** – *Federal Communications Commission*) і національні Інститути (Комітети або Міністерства) Стандартизації, які існують практично у всіх розвинених країнах.

Всі згадані організації намагаються скоріше співробітничати, ніж конкурувати, тому часто вони просто приєднуються до стандарту, підготовленого інший стороною. Таким чином, тексти багатьох документів фактично збігаються. Наприклад, знаменита Рекомендація 601 МККР еквівалентна Рекомендації SMPTE 125M, Рекомендації EBU Tech. 3246-E і Рекомендації 106 OIRT.

Діапазони частот звукового ефірного радіомовлення (РМ)

Мовлення в радіоефірі здійснюється за допомогою радіопередавачів (приймання передач, відповідно, за допомогою радіоприймачів, див. рис.4.2) відповідної потужності, які передають інформацію на обраній частоті електромагнітного випромінювання. Радіопередавач із супутнім обладнанням (студії, канали зв'язку, системи електроживлення, антенно-фідерні пристрої тощо) називають ***радіомовною станцією***.

Рис.4.2 – Абонентські монофонічні радіомовні приймачі

Частота випромінювання є головною характеристикою радіомовної станції. У перші десятиліття розвитку радіомовлення для позначення характеристики несівних коливань використовували довжину хвилі випромінювання, відповідно – шкали радіоприймачів були проградуйовані в *метрах*. Зараз несівні коливання станцій позначають частотою й, відповідно, шкали радіоприймачів градуюють у *кГц* та *МГц*.

Як правило, в ефірному аналоговому радіомовленні звук модулює несівну частоту передавача одним із способів модуляції: амплітудним (АМ) або частотним (ЧМ). ЧМ дозволяє здійснювати високоякісне (як правило, стереофонічне) мовлення в діапазоні частот УКХ. В інших діапазонах із більш довгими хвилями (ДХ, СХ, КХ) використовується АМ, або цифрове радіомовлення стандарту *DRM*. Спроби використання односмугової модуляції (*SSB*) в радіомовленні особливого успіху не мали.

Радіочастотний ефір є обмеженим природним ресурсом, яким користується людство всіх континентів Землі. Розподіл радіочастот між окремими країнами та регламентація роботи радіозасобів проводяться на *Всесвітніх* або *Регіональних адміністративних конференціях радіозв'язку* (ВАКР, РАКР). В 1979 році в Женеві ВАКР був затверджений Регламент радіозв'язку, що закріплює певні частотні діапазони для радіомовлення (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Діапазони частот для радіомовлення

Загальна назва хвиль	**Діапазон частот**	**Позначення**		**Модуляція**		**Стандарт стерео мовлення**
		укр.	**англ.**	**аналог.**	**цифр.**	
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Довгі хвилі	148,5…283,5 кГц	ДХ	LW	*AM*	*DRM*	*DRM*
Середні хвилі	522…1720 кГц	СХ	MW	*AM*	*DRM*	*DRM*
1	**2**	**3**	**4**	***5***	***6***	***7***
Короткі хвилі	3,95…4,85 МГц	КХ-1 (75м)	SW (75m)	*AM*	*DRM*	*DRM*
	4,85…5,90 МГц	КХ-2 (60м)	SW (60m)	*AM*	*DRM*	*DRM*
	5,95…6,20 МГц	КХ-3 (49м)	SW (49m)	*AM*	*DRM*	*DRM*
	7,10…7,30 МГц	КХ-4 (41м)	SW (41m)	*AM*	*DRM*	*DRM*
	9,50…9,90 МГц	КХ-5 (31м)	SW (31m)	*AM*	*DRM*	*DRM*
	11,65…12,05 МГц	КХ-6 (25м)	SW (25m)	*AM*	*DRM*	*DRM*
	13,60…13,80 МГц	КХ-7 (22м)	SW (22m)	*AM*	*DRM*	*DRM*
	15,10…15,60 МГц	КХ-8 (19м)	SW (19m)	*AM*	*DRM*	*DRM*
	17,55…17,90 МГц	КХ-9 (16 м)	SW (16m)	*AM*	*DRM*	*DRM*
	21,45…21,85 МГц	КХ-10 (13м)	SW (13m)	*AM*	*DRM*	*DRM*
	25,67…26,10 МГц	КХ-11 (11м)	SW (11m)	*AM*	*DRM*	*DRM*

1	2	3	4	5	6	7
Ультра-короткі хвилі	65,9…74 МГц	УКХ, УКХ-1	*OIRT*	ЧМ ($f_{дев}$=50кГц)	*DRM+, DAB*	з полярною модуляцією
	87,5…108 МГц	УКХ-2	*FM, CCIR, VHF*	ЧМ ($f_{дев}$=75кГц)	*DRM+, DAB*	з пілот-тоном

Особливості радіомовлення в діапазонах ДХ, СХ і КХ

В діапазонах ДХ і СХ рознесення між несівними частотами мовних радіостанцій (РСТ) складає ***9 кГц***. Кожній станції призначається номер каналу. У діапазоні ДХ – **15** каналів (номери каналів: *17,18, ...31*). В діапазоні СХ – **120** каналів (номери каналів: *59,60, ...178*). Номер каналу, помножений на *9 кГц*, визначає частоту несівної.

Для діапазону ДХ:

$$f_{н17} = 17 \times 9\ кГц = 153\ кГц\ ;\ ...,\ f_{н31} = 31 \times 9\ кГц = 279\ кГц.$$

Для діапазону СХ:

$$f_{н59} = 59 \times 9\ кГц = 531\ кГц\ ;\ ...,\ f_{н178} = 178 \times 9\ кГц = 1602\ кГц.$$

Якщо РСТ розташовані у віддалених географічних зонах (що практично виключає взаємні завади), їм можуть бути призначені однакові несівні частоти.

В діапазоні КХ крок сітки несівних частот РСТ складає *5 кГц*, а рознесення несівних близько розташованих РСТ – не менше *10 кГц*. Якщо РСТ розташовані у віддалених географічних зонах, допускається рознесення несівних *5 кГц*.

В діапазонах ДХ і СХ використовується амплітудна модуляція (АМ), у діапазоні КХ – АМ. Нижня частота первинного сигналу модуляції в діапазонах ДХ, СХ і КХ знаходиться в межах $F_н$=50…150 Гц, верхня частота в діапазонах ДХ і СХ – $F_в$=4,5…10 кГц, а в діапазоні КХ – $F_в$=4,5 кГц. Смуга частот радіоканалу, що займається однією РСТ у діапазонах ДХ, СХ і КХ при АМ, приймає значення $\Delta f = 2F_в$ = 9…20 кГц.

Потужність передавачів радіомовних станцій в діапазонах ДХ і СХ – 100…2000 кВт, а в діапазонах КХ – 10…100 кВт.

На розповсюдження радіохвиль впливають *Земля* та *атмосфера*. Вплив *Землі* проявляється в тому, що частина енергії радіохвиль, що поширюються уздовж поверхні Землі, поглинається ґрунтом. Поглинання відбувається через порушення радіохвилями в ґрунті високочастотних струмів, при цьому частина енергії радіохвиль перетворюється в тепло. *Зі збільшенням частоти поглинання зростає.*

Приймання дальніх радіостанцій на *довгих* та *середніх хвилях* можливе на частотах, які трохи нижче МЗЧ – коли ще є відбиття від іоносфери, а поглинання в ній мінімальні. Для шару *D* МЗЧ не перевищує сотень кілогерц, і цей шар добре відбиває тільки наддовгі хвилі. Шар *E* добре відбиває радіохвилі із частотами до декількох мегагерц. Тому вночі, коли відсутнє поглинання в шарі *D*, можливе приймання дальніх радіостанцій, що працюють на довгих і середніх хвилях. Дальність розповсюдження хвиль "одним стрибком" при відбитті від шару *E* визначається радіусом Землі, висотою шару *E* (*близько 120 км*) і становить 2500...3000 км. Вдень же радіохвилі, щоб відбитися від шару *E* і повернутися на Землю, треба двічі пройти через шар *D*. При цьому сигнал сильно загасає і до радіослухача практично не доходить. Тому вдень на середніх радіохвилях чутні тільки місцеві радіостанції. Довгі ж хвилі за рахунок дифракції навколо земної поверхні при підвищеній потужності передавача (1000 кВт і більш) можуть розповсюджуватися на досить великі відстані (1000...3000 км) і вдень.

Короткі хвилі відбиваються переважно шаром *F*. Висота шару *F* вище, чим шару *E*, тому дальність поширення "одним стрибком" коротких хвиль може досягти 5000 км. Через слабке загасання коротких хвиль в атмосфері можливо їх розповсюдження декількома стрибками, коли відбувається кількаразове перевідбиття від поверхні Землі та від іоносфери. Більше того, можливі відбиття рикошетом від різних шарів іоносфери та повернення радіохвиль на Землю на дуже великій відстані від передавача.

Короткі хвилі з довжинами від 75 до 49 метрів мають яскраво виражений «*нічний*» характер далекого поширення, використовуються в основному для мовлення на регіони, що максимально віддалені від передавача. У денний час рівень промислових завад в цій частині частотного спектра настільки великий, що якісне радіомовлення неможливо.

Короткі хвилі піддіапазонів 41, 31, 25, 19 метрів відносно вільні від промислових завад (зі збільшенням частоти промислові завади зменшуються), мають тенденцію до більш «*денного*» поширення із підвищенням частоти, дозволяють забезпечити цілодобове якісне мовлення.

Короткі хвилі піддіапазонів 16, 13 і 11 метрів – типово «*денні*» діапазони, в них практично відсутні промислові та атмосферні завади.

Особливості радіомовлення в діапазонах УКХ діапазоні

Частоти для УКХ-радіомовлення виділялися всередині телевізійних діапазонів метрових хвиль (в *OIRT* – між другим і третім телевізійними каналами, а в *CCIR* – між п'ятим телевізійним і першим кабельним (*S1*) каналами) споконвічно відрізнялися. На вибір частот для радіомовлення

вплинуло бажання унеможливити прослуховування закордонних передач у прикордонних зонах колишніх СРСР та інших соціалістичних країнах.

Відмінності діапазонів УКХ *CCIR* та УКХ *OIRT* не тільки в діапазоні займаних ними частот, але і в технічних параметрах сигналу, що випромінюється – смузі частот, яка відводиться для однієї радіостанції, девіації частоти, принципі кодування стерео, можливості додавання сигналу *RDS (Radio Data System*) для передачі буквено-символьної інформації.

Таким чином, у діапазоні метрових хвиль для радіомовлення по суті представлено декілька піддіапазонів:

– УКХ-1: 65,9…74 МГц (використовується тільки в країнах колишнього СРСР);

– УКХ-2: 87,5…108 МГц (використовується в країнах Європи та Америки);

– 76…90 МГц (використовується тільки в Японії).

Більшість країн використовують центральні частоти каналу УКХ мовлення, що закінчуються на 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 і 0,9 МГц, але в деяких країнах також використовують центральні частоти, що закінчуються на 0,0; 0,2; 0,4; 0,6 або 0,8 МГц, або інші значення.

Основні характеристики мовлення в діапазонах (УКХ-1, УКХ-2 (*FM*)):

– назва діапазону – метрові хвилі;

– довжина хвилі – 4,6…2,8 м;

– частота – 65,9…108 МГц;

– вид поширення – поверхневі та просторові хвилі;

– рознесення несівних частот в межах одного міста - не менш 0,12 МГц (УКХ-1), не менш 0,2 МГц (УКХ-2);

– вид модуляції – частотна модуляція;

– максимальна девіація частоти - 50 кГц (УКХ-1) та 75 кГц (УКХ-2);

– діапазон відтворюваних звукових частот (ПЕС) – 30 Гц…15 кГц;

– вид мовлення – стерео або моно.

В діапазоні **УКХ-1** (65,9…74 МГц) по стандарту *OIRT* – максимальна девіація частоти складає $f_{д\ max} = \pm 50$ кГц, постійна часу ланцюга частотних передспотворень сигналу модуляції $\tau_п = 50$ мкс, смуга частот первинного сигналу модуляції від $F_н = 0{,}03$ кГц до $F_в = 15$ кГц.

В діапазоні **УКХ-2** (87,5…108 МГц) по стандарту *CCIR* – максимальна девіація частоти складає $f_{д\ max} = \pm 75$ кГц, постійна часу ланцюга частотних передспотворень сигналу модуляції $\tau_п = 75$ мкс, смуга частот первинного сигналу модуляції від $F_н = 0{,}04$ кГц до $F_в = 15$ кГц.

Потужність УКХ-передавачів радіомовних станцій – 0,2…15 кВт.

Здатність хвилі огинати перешкоди в УКХ-діапазоні мінімальна, сигнал може розповсюджуватися тільки в зоні прямої (майже оптичної) видимості між передавальною й приймальними антенами; даний діапазон вільний від атмосферних та промислових завад (електродвигуни, системи запалювання автомобілів тощо), широкий діапазон частот дозволяє використовувати для модуляції більш широкосмугову, але більш ефективну частотну модуляцію. Для збільшення зони прямої видимості передавальні та/або приймальні антени піднімають на максимально можливу висоту, що дозволяє забезпечити радіопокриття на відстані до 60…80 км в залежності від рельєфу місцевості. Для розширення зони мовлення необхідно використовувати ретранслятори. УКХ-діапазон є ідеальним для радіомовлення у великих і середніх містах. Однак напруженість поля в метровому діапазоні нерівномірна, тому що прямі хвилі зустрічаються з відбитими від Землі й будинків хвилями та у безпосередній близькості від передавача можуть виникати звукові спотворення. Тому рекомендується розташовувати передавальні антени на відстані від густонаселених районів.

Еволюція систем радіомовлення зображена на рис. 4.3.

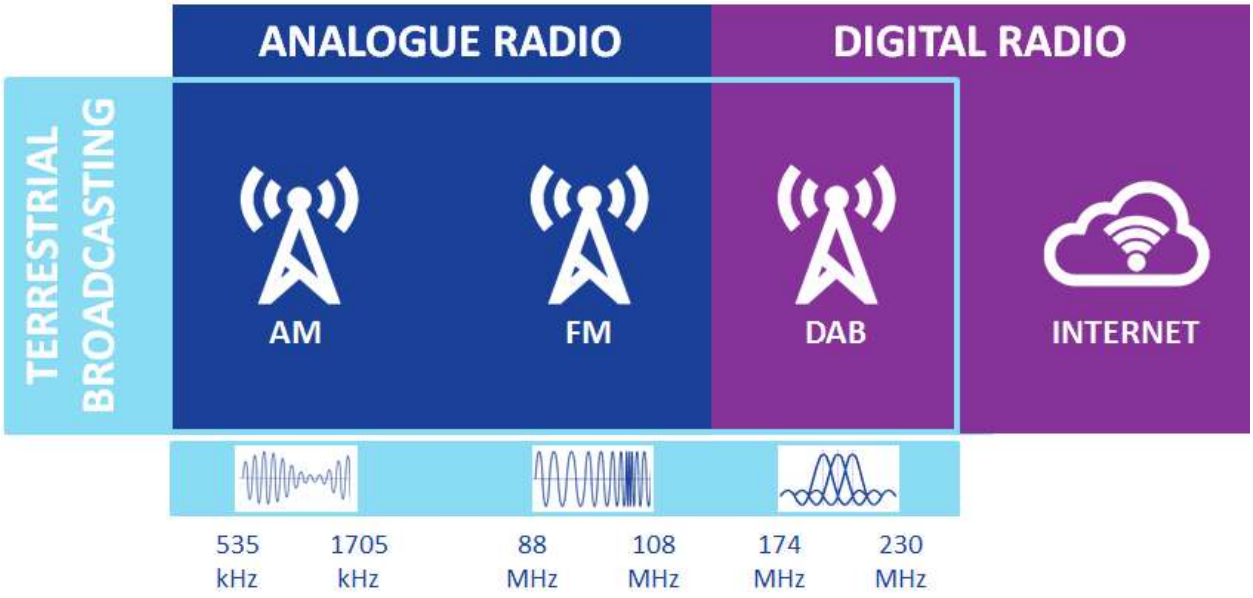


Рис.4.3. **Еволюція систем радіомовлення**

Контрольні запитання і завдання

1. Як класифікують системи мовлення та в чому полягають їх особливості?
2. Які міжнародні організації займаються стандартизацією в галузі мовлення?
3. Які види модуляції використовують в аналоговому радіомовленні і чому?

4. Які особливості радіомовлення в діапазонах ДХ, СХ і КХ (діапазони частот, рознесення частот радіостанцій, вид модуляції, дальність радіопокриття радіомовних станцій та його особливості)?
5. Задача: розрахувати центральну частоту мовної радіостанції, яка використовує частотний канал з номером **63**.
6. Які особливості радіомовлення в діапазонах УХК (діапазони частот, рознесення частот радіостанцій, вид модуляції, дальність радіопокриття та його особливості)?
7. Чим відрізняються характеристики випромінювання радіомовних станцій в діапазонах УКХ-1 та УКХ-2?
8. Які діапазони частот є найбільш популярними для радіомовлення в теперішній час і чому?

4.2. Стандарти стереофонічного звукового мовлення

Загальні положення

Як відомо, ***стереофонічний звук*** або *стерео – це спосіб запису і відтворення звуку, при якому створюється ілюзія різноспрямованої звукової перспективи*. Це, як правило, досягається за рахунок використання двох або більше незалежних звукових каналів через конфігурації з двома або більше гучномовцями (або стерео навушниками) так, щоб створити враження нібито звук чутний з різних сторін, як у природному звучанні.

Існують два принципово різних способи отримання стереофонічного запису. При *першому* для фіксації звукового поля використовуються два і більше мікрофонів, рознесених на певну відстань один від одного. Струм звукової частоти, який створюється кожним із мікрофонів, підсилюється окремими незалежними один від одного підсилювачами, і записується на окремі канали носія. При відтворенні звук, отриманий від кожного з мікрофонів, підсилюється незалежно і подається на окремі гучномовці або акустичні системи, які розташовані відповідно до розміщення мікрофонів. Таким чином відтворюється звукова картина, що існувала в момент запису.

Другий спосіб отримав назву *псевдостерео*, і на відміну від першого не вимагає використання декількох мікрофонів для запису звукового поля. Стереофонічна фонограма створюється шляхом розподілу по різних каналах декількох вхідних монофонічних записів за допомогою зведення (мікшування). При цьому ефект локалізації джерел звуку створюється як регулюванням рівня запису в різних каналах, так і корекцією частотної характеристики, оскільки відомо, що високі частоти в найбільшою мірою впливають на ілюзію напрямку. Крім того, ефект додатково досягається

регулюванням інтенсивності відбитого звуку, ступеня запізнювання за допомогою ліній затримки тощо.

При впровадженні систем стереофонічного мовлення розробникам необхідно було вирішити наступні питання:

– можливість приймання стереопрограм на звичайні монофонічні приймачі, звичайно, без стереоефекту;

– приймання стереопрограм не повинне підвищувати вимоги до рівня сигналу на вході приймача й зменшувати дальність дії передавачів;

– стереофонічне мовлення не повинне приводити до значного збільшення займаної смуги частот (не більш 300 кГц).

– вартість стереофонічних передавачів і приймачів не повинна бути набагато більше вартості якісних монофонічних.

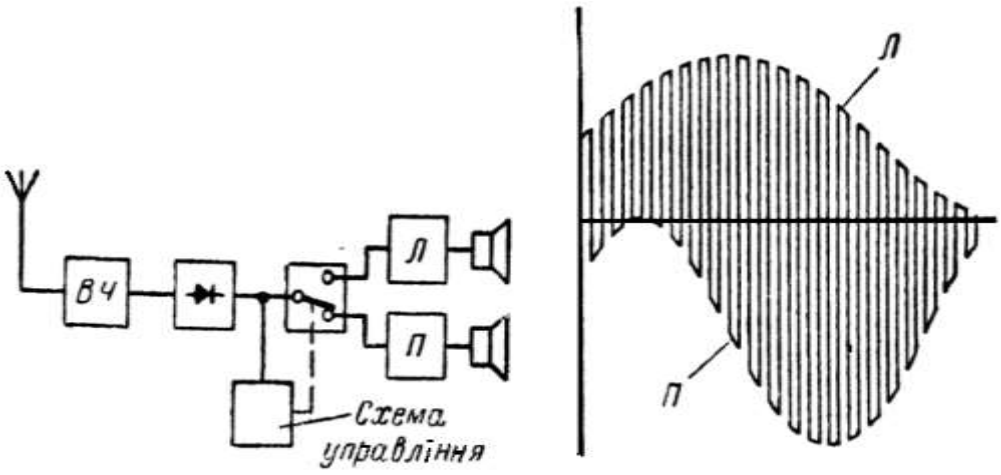
Деякі приклади технічної реалізації систем стереомовлення:

– система із двома передавачами, що працюють на різних частотах для трансляції лівого і правого каналів;

– система з одночасною частотною та амплітудною модуляціями;

– система з окремо модульованими бічними смугами (розробник – фірма RCA);

– система з часовим розподілом каналів (модулююча напруга, подавалася на модулятор по черзі з правого та лівого каналів) (рис.4.4);



а б

Рис.4.4 – Схема приймача (а) і форма сигналу (б)

– система із піднесівною частотою (спектр стерео сигналу складається із сумарного сигналу (Л+П), піднесівної та її бічних смуг) (приклади – системи Crosby, Armstrong, Zenith…);

– система з пілот-тоном, або з піднесівною частотою (приклад – американська система GE).

При розробці систем стереофонічного мовлення, насамперед, вирішували завдання сумісності, тобто можливості приймання стереофонічного сигналу на монофонічний приймач без стереодекодера і монофонічного сигналу на приймач із стереодекодером. В обох випадках передачі, звичайно, будуть звучати як монофонічні. З названої вище причини в системах стереофонічного мовлення передаються не окремі сигнали лівого (L) і правого (R) каналів, а їх сума (L+R) та різниця (L-R).

Із безлічі запропонованих систем у теперішній час практичну реалізацію знайшли дві системи аналогового стереофонічного радіомовлення:

– ***система з полярною модуляцією***, яка була розроблена в колишній СРСР і відповідала східно-європейському стандарту ***OIRT***;

– ***система з пілот-тоном***, яка розроблена в США на основі систем *Zenith* і *GE,* а в Європі відповідала західно-європейському стандарту ***CCIR***.

Ці системи почали експлуатуватися з початку 60-х років, і були затверджені в якості стандарту *Рекомендацією 450 МККР* в 1966 році, а в наступні роки були трохи вдосконалені.

Рис.4.5 – Стереофонічний радіомовний приймач

Система з полярною модуляцією

Суть системи стереозвукового мовлення з *полярною модуляцією* полягала в тому, що для забезпечення сумісності з монофонічними приймачами в ній був застосований сумарно-різницевий метод формування *комплексного стереосигналу*. Для цього на передавальній стороні з вихідного двоканального стереосигналу *L* і *R* за допомогою матричної схеми формувалися два допоміжні сигнали: сумарний (*L*+*R*) і різницевий (*L*-*R*).

Сумарний сигнал (*L*+*R*) передавався звичайним способом за допомогою частотної модуляції несівної частоти УКХ ЧМ-передавача. Різницевим же сигналом (*L*-*R*) модулювалася амплітуда додаткової піднесівної частоти 31,25 кГц, яка чисельно дорівнювала частоті другої гармоніки частоти рядкової розгортки телевізорів (15625 Гц) тому, що передбачалося надалі використовувати цю систему і для передачі стереозвуку в телебаченні.

В результаті на виході стереомодулятора утворюється ***полярно-модульований сигнал*** (ПМС). Його форма зображена на рис. 4.6а, а спектр – на рис. 4.6б.

Тому, що на передачу додаткового різницевого стереосигналу було потрібно витратити частину потужності УКХ-передавача, та для покращення відношення сигнал/шум на передавальній стороні в ланцюгу придушення піднесівної рівень піднесівної стереозвуку на частоті 31,25 кГц зменшували в 5 разів (на 14 дБ) по амплітуді за допомогою режекторного контуру із стандартизованою добротністю 100±5. Одночасно контур послабляє і нижні частоти бічних смуг різницевого сигналу (*L*-*R*). Як відомо, у передавачі при частотній модуляції до формування ПМС у звукові сигнали лівого (*L*) і правого (*R*) каналів вводяться передспотворення з метою підняття рівня верхніх частот звукового спектра. Це вирівнює спектр реального звукового сигналу, основна потужність якого зосереджена на низьких частотах, і підвищує відношення сигнал/шум усього тракту передачі.

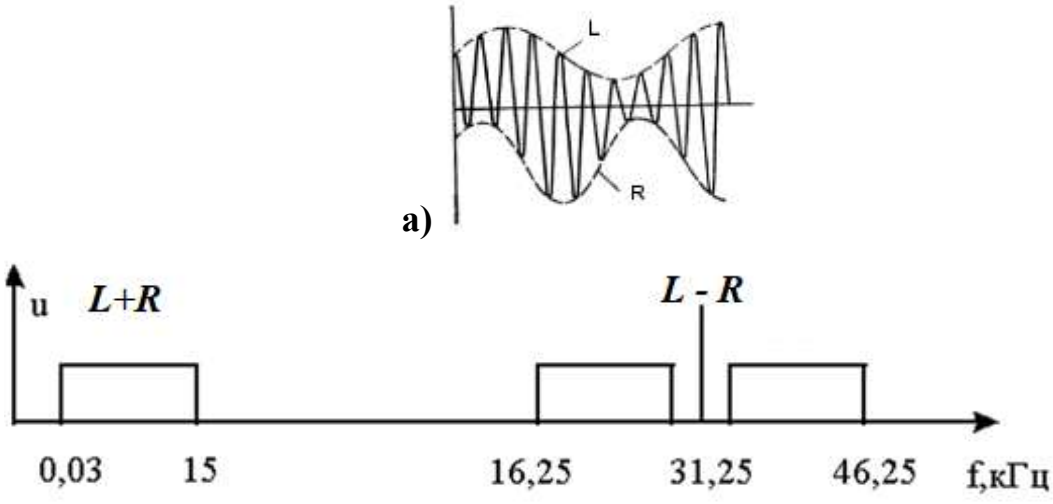


Рис. 4.6 – Форма(а) і спектр(б) полярно-модульованого сигналу

Отриманий в результаті цих перетворень сигнал зі складним спектром, який містить у своєму складі крім низькочастотного (тонального) *сумарного* сигналу, ще й високочастотний (надтональний) *різницевий* сигнал на

амплітудно-модульованій піднесівній з двома бічними смугами, прийнято називати ***комплексним стерео сигналом*** *(КСС)*(рис. 4.7).

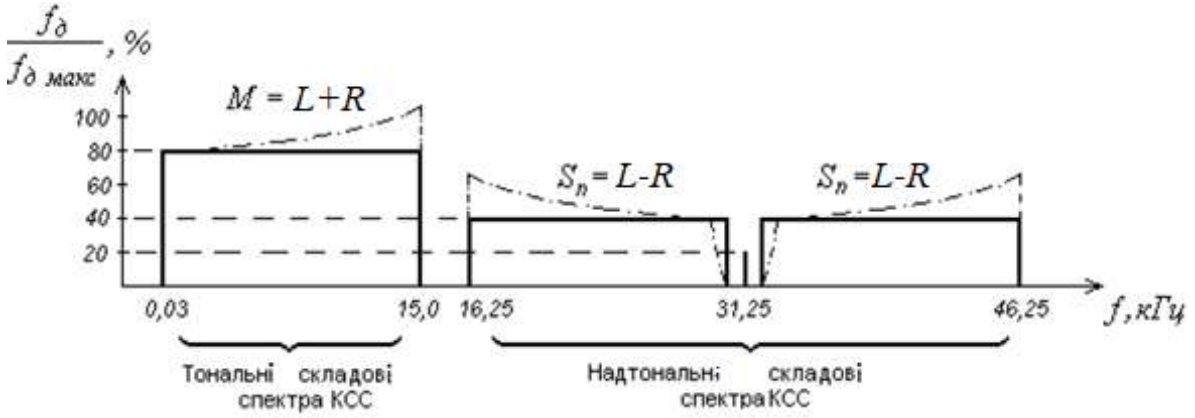


Рис. 4.7 – Спектр КСС у системі з полярною модуляцією із придушенням піднесівної (суцільні лінії) та з урахуванням частотного передспотворення (штрих-пунктирні лінії)

На рис. 4.8 зображена структурна схема стереофонічного ЧМ-передавача, що містить, на відміну від монофонічного ЧМ-передавача, ***два канали*** звукової частоти з підсилювачами звукової частоти (ПЗЧ) і ланцюгами частотного передспотворення (ЛП), сумарно-різницевий перетворювач (СРП) звукових сигналів, амплітудний модулятор (АМ), генератор піднесівної (ГП), лінію затримки (ЛЗ) сумарного сигналу *M*, необхідну для компенсації затримки різницевого сигналу *S* в АМ, підсумовуючий пристрій (ПП), ланцюг придушення піднесівної (ЛПП). Потім КСС надходить на ЧМ-передавач, який складається зі збуджувача ЧМ-сигналу (ЧМЗ), підсилювача потужності радіосигналу (ППР) із смуговим фільтром (СФ) і антени (А).

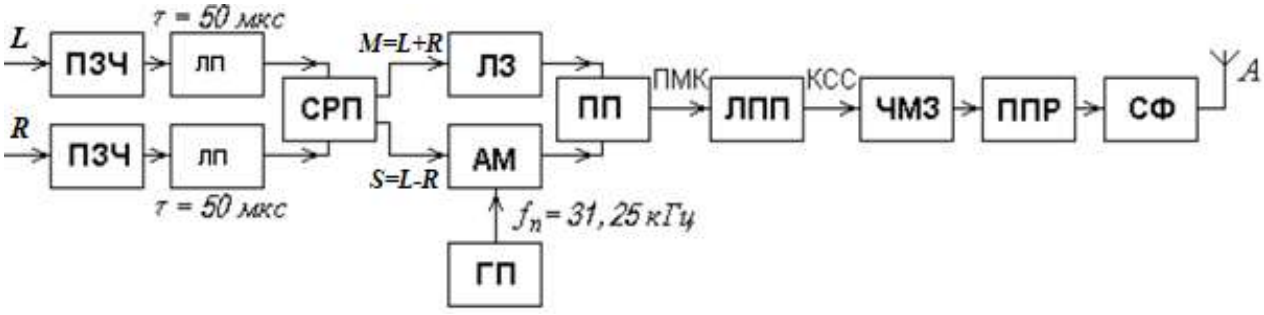


Рис. 4.8 – Структурна схема передавального тракту з полярною модуляцією

Параметри системи з полярною модуляцією були обрані таким чином, щоб чисельні значення девіації частоти несівної передавача були однаковими від впливу на частотний модулятор пікових рівнів сумарного та різницевого стереосигналів. При цих умовах отриманий на приймальній стороні на виході ЧМ-демодулятора полярно-модульований сигнал має чудову властивість: верхня огинаюча коливань піднесівної частоти виявляється промодульованою сумарним (*L*+*R*) стереосигналом, а нижня огинаюча – різницевим (*L*-*R*). Цим забезпечується повна сумісність із наявними у користувачів радіоприймачами УКХ-діапазону, тому що звичайні приймачі відтворювали сумарний сигнал (*L*+*R*), переданий у тональній смузі частот 30…15000 Гц, що й забезпечувало їхнє повноцінне монофонічне звучання.

Стереофонічні приймачів, які були оснащені спеціальними пристроями – стереодекодерами, могли з їхньою допомогою виділяти із прийнятого комплексного стереосигналу додаткову інформацію про різницевий сигнал (*L*-*R*), переданий на під несівній частоті 31,25 кГц з амплітудною модуляцією. Потім цей різницевий сигнал (*L*-*R*) разом із сумарним стереосигналом (*L*+*R*) надходив на схему матричного суматора, де шляхом простих сумарно-різницевих перетворень із них можна отримати сигнали двох початкових стереозвукових каналів – лівого та правого. Насправді, шляхом підсумовування ((*L*+*R*) + (*L*-*R*)) утворюється сигнал 2*L* лівого каналу, а шляхом вирахування ((*L*+*R*) – (*L*-*R*)) – виходить сигнал 2*R* правого каналу.

Як бачимо, радянська система аналогового стереомовлення з полярною модуляцією створювалася, розраховуючи на застосування *амплітудних детекторів*, а основним доводом була простота стереодекодерів.

Система з пілот-тоном

Західноєвропейська система стереомовлення на УКХ (діапазон УКХ-2 або *FM*) виникла на базі розробок фірм “*Zenith Radio*” і “*General Electric”* (США), що послужили основою американського стандарту, затвердженого Федеральним агентством по зв’язку США (*FCC*).

В *системі з пілот-тоном* насправді багато спільного із системою з полярною модуляцією. Зокрема, для забезпечення сумісності з монофонічними приймачами в цій системі в смузі частот 40…15000 Гц також передається сумарний сигнал (*L*+*R*), а для забезпечення стереофонічного прийому в смузі частот 23…53 кГц – різницевий звуковий сигнал (*L*-*R*), отриманий методом *амплітудної балансної модуляції* додаткової піднесівної частоти 38 кГц (рис. 4.9).

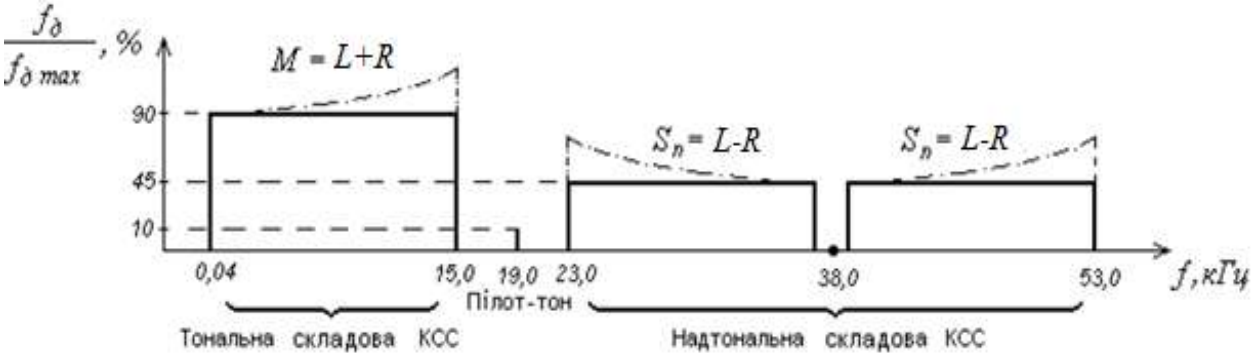


Рис. 4.9 – Спектр КСС у системі з пілот-тоном

Як відомо, при балансній модуляції з метою зменшення випромінюваної передавачем потужності сигнал несівної частоти повністю придушувався, а на виході балансного модулятора залишалися лише дві бічні смуги модульованого радіосигналу. Це помітно підвищує ефективність використання потужності передавача, яка витрачається даремно на передачу піднесівної стереозвуку при АМ.

Але балансна модуляція породжує іншу складну проблему – для того, щоб одержати в приймачі початковий спектр вихідного АМ-сигналу, доводиться передавати додатковий пілот-сигнал із частотою, вдвічі меншою піднесівної (тобто на частоті 38:2=19 кГц). В стереодекодері приймача відбувається відновлення придушеної при передачі піднесівної 38 кГц шляхом подвоєння частоти пілот-сигналу.

Структурна схема стереофонічного передавача, в якому формується КСС із пілот-тоном, зображена на рис. 4.10.

Передавач містить два канали звукової частоти із (ПЗЧ+ЛП), сумарно-різницевий перетворювач (СРП) звукових сигналів, балансний амплітудний модулятор (БМ), генератор пілот-тону (ГПТ), подвоювач частоти пілот-тону (ПЧ), лінію затримки (ЛЗ) сигналу *M*, яка необхідна для компенсації затримки сигналу в БМ, підсумовуючий пристрій (ПП), збуджувач ЧМ-сигналу (ЧМЗ), підсилювач потужності радіосигналу (ППР), смуговий фільтр (СФ) та антену.

Як бачимо, основна принципова відмінність між радянською системою з полярною модуляцією та американською з пілот-тоном полягає в способі амплітудної модуляції різницевого (*L–R*) стереосигналу. Інші ж якісні показники обох систем практично однакові.

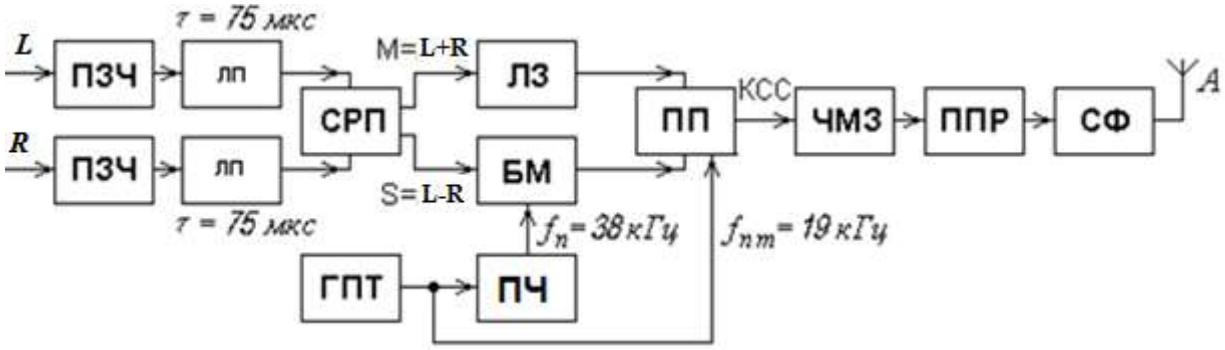


Рис. 4.10 – Структурна схема ЧМ-передавача стереофонічної системи радіомовлення з пілот-тоном

Завдяки більш низькій частоті піднесівної різницевого сигналу (31,25 кГц) система стандарту *OIRT* має більш вузький спектр (192,5 кГц проти 256 кГц в *CCIR* для стереомовлення, а для монофонічного мовлення – 130 кГц і 180 кГц відповідно), що дозволяє в принципі розмістити в УКХ-діапазоні більше число станцій і більш ефективно використовувати потужність передавача. Однак, в системі з полярною модуляцією "зазор" між верхньою граничною частотою тональної частини спектра (15 кГц) і границею нижньої бічної смуги модульованої піднесівної (16,25 кГц) становить всього лише ледве більше 1 кГц, що пред'являє досить жорсткі вимоги до ланцюгів фільтрації надтонального сигналу. В американській же системі з пілот-тоном ця різниця частот становить цілих 8 кГц, що дозволяє достатньо просто відфільтрувати тональний і надтональний сигнали. Тому ймовірність виникнення перехресних спотворень у стереодекодерах системи з полярною модуляцією значно вище.

На початку 60-х років пришлого століття обидві системи стереозвуку рішеннями МККР і *OIRT* були рекомендовані як базові для впровадження в інших країнах світу.

Крім радянської та американської систем Міжнародним союзом електрозв'язку (МСЕ) рекомендована система ЧМ-ЧМ, що була запропонована (значно пізніше перших двох) в Швеції. Відмінність від розглянутих систем полягала в тому, що частота піднесівної модулювалася різницевим сигналом (L-R) не по амплітуді, а по частоті. Крім того, цей сигнал для підвищення його завадозахищеності піддавався компандуванню (канал (L-R) стереомодулятора містив компресор, а стереодекодер приймача – відповідно експандер).

Регулярне стерео мовлення в СРСР було почато з 1963 року, а в США – з 1961 року. В Європі стереопередачі почалися значно пізніше (в 1966-1967

роках) тому, що європейці ретельно вивчали переваги та недоліки обох систем і після довгих роздумів з незначними змінами прийняли американську систему з пілот-тоном, яка в європейській версії стала називатися системою ***CCIR***.

Відмінності європейської та американської версій систем стерео радіомовлення з пілот-тоном невеликі. Основне з них – різні значення постійних часу ланцюгів ВЧ-передспотворень: в Європі – дорівнює 50 мкс, а в США та Канаді – 75 мкс. Крім того, в США передбачалося можливість передачі на піднесівній частоті 67 кГц ще одного додаткового вузькосмугового звукового сигналу ***SCA*** *(Subsidiary Communications Authorization*), який може використовуватися для передачі додаткової інформації або музичного фону до основної стерео програми (рис. 4.11).

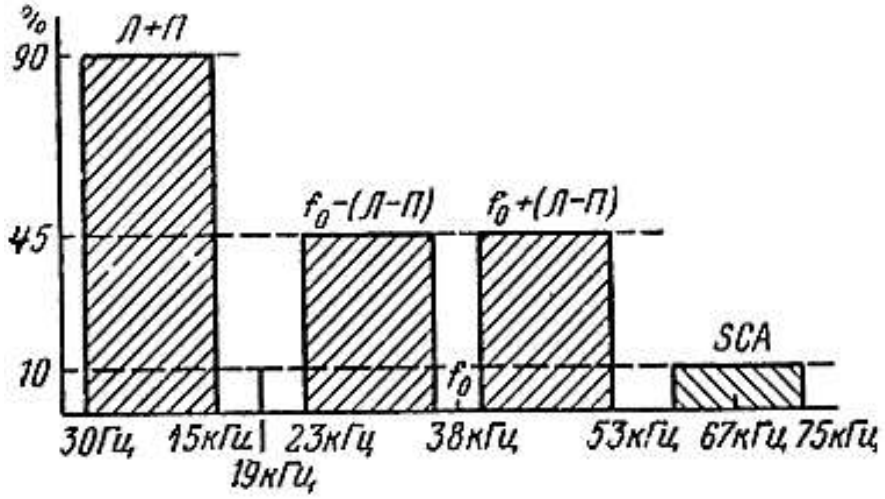


Рис.4.11 – Спектр КСС системи з пілот-тоном у відповідності зі стандартом *FCC (США)*

В європейській системі *CCIR* дозволено передавати на частоті піднесівної 57 кГц (третя гармоніка пілот-тону 19 кГц) *замість SCA* цифрові дані по системі ***RDS*** *(Radio Data* System) – стандарт передачі інформаційних повідомлень по каналах ЧМ-радіомовлення в діапазоні УКХ-2: 87,5…108 МГц. В 1999 році стандарт *RDS* ***IEC 62106*** був прийнятий членами Європейського радіомовного союзу (***EBU***) в якості єдиного багатоцільового стандарту.

На рис. 4.12 представлений спектр комплексного стерео сигналу з пілот-тоном, до складу якого входить стереофонічний сигнал основної програми та сигнал додаткової інформації *RDS*, переданий з використанням піднесівної 57 кГц, яка модулюється по амплітуді попередньо профільтрованим біфазним кодованим сигналом даних. Ця піднесівна частота придушується.

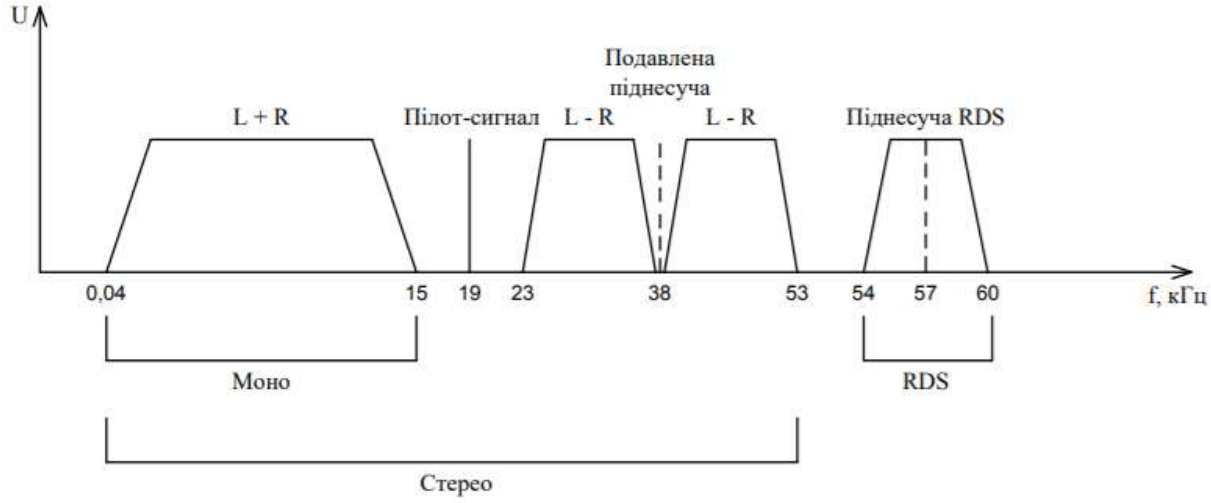


Рис.4.12 – Спектр КСС у відповідності зі стандартом *CCIR*

Основні параметри стандарту *RDS*:

- частота піднесівної RDS – 57 кГц;
- частота пілот-тону (pilot-tone) – 19 кГц ± 2 кГц;
- припустиме відхилення частоти піднесівної RDS – ± 6 Гц;
- номінальна девіація несівної частоти RDS – ± 1,2 кГц;
- швидкість передачі даних – 1187,5 ± 0,125 біт/с.

В даний час в системі *RDS* передбачена можливість реалізації великої кількості функцій, однак, як правило, в *RDS*-радіоприймачах використовуються тільки п'ять основних, так званих базисних, функцій:

– *PI* – відображення на табло приймача назви прийнятої програми (радіостанції) і номіналу її робочої частоти;

– *AF* – можливість автоматизованої перебудови радіоприймача, наприклад в разі погіршення прийому сигналів на даній частоті, на інші частоти, на яких також здійснюється передача сигналів даної програми;

– *PS* – інформує про назву програм, що передаються радіостанцією;

– *TP* – містить інформацію про порядок організації руху на трасі;

– *TA* – містить інформацію про зміни обстановки на дорозі.

Передача інформації в системі *RDS* здійснюється групами. Група є найбільшим елементом структури і складається з 104 біт. У кожній групі є 4 блоки даних по 26 біт. У кожний блок входять інформаційні й контрольні слова, які складаються із 16 і 10 біт відповідно. Перший блок кожної групи завжди містить код ідентифікації програм *PI*. Для виявлення і виправлення

помилок використовується контрольне слово (КС). Структурні схеми передавача та приймача з *RDS* представлені відповідно на рис. 4.13 та 4.14.

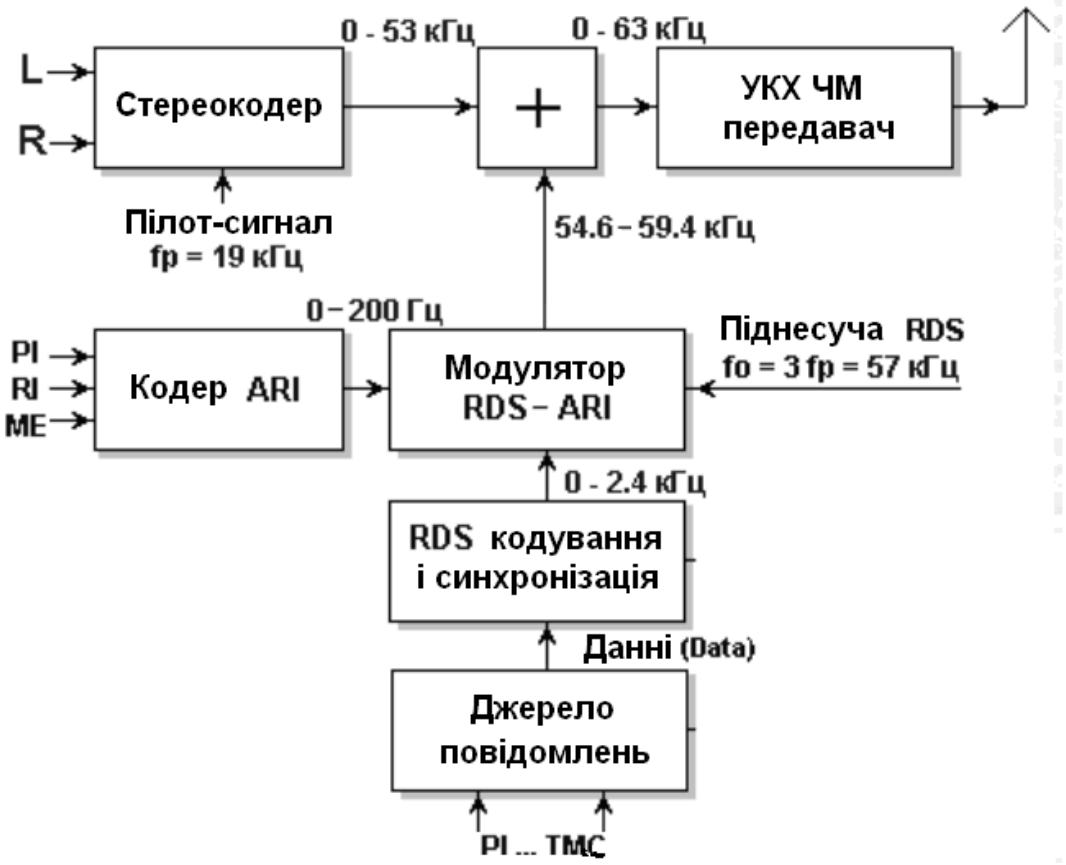


Рис.4.13 – Структура пристрою формування *RDS*-сигналу

Крім основного стандарту *RDS*, який підтримується Європейським Радіомовним Союзом (*EBU)*, існують і інші системи. Так, наприклад, у США Національним Комітетом Радіосистем (*NRSC-National Radio Systems Committee)* у 1992 року був прийнятий стандарт на систему передачі даних ***RBDS*** *(Radio Broadcast Data System*), в якій повністю включені всі основні положення системи *RDS*. Внесені модифікації мали на меті адаптацію *RDS* до існуючої системи радіомовлення США, що використовує діапазон радіочастот 88…108 МГц і впровадженню варіанта системи стереомовлення з адаптивним компандуванням сигналів (*FMX – Extended Range FM Stereo System*). Інші відмінності були не принциповими і не порушували сумісність систем.

Крім *RDS* для систем стандарту *CCIR* дозволено додатково використовувати наступні системи:

- передачі дорожньої інформації (AIR);
- високошвидкісної передачі даних (DARC).

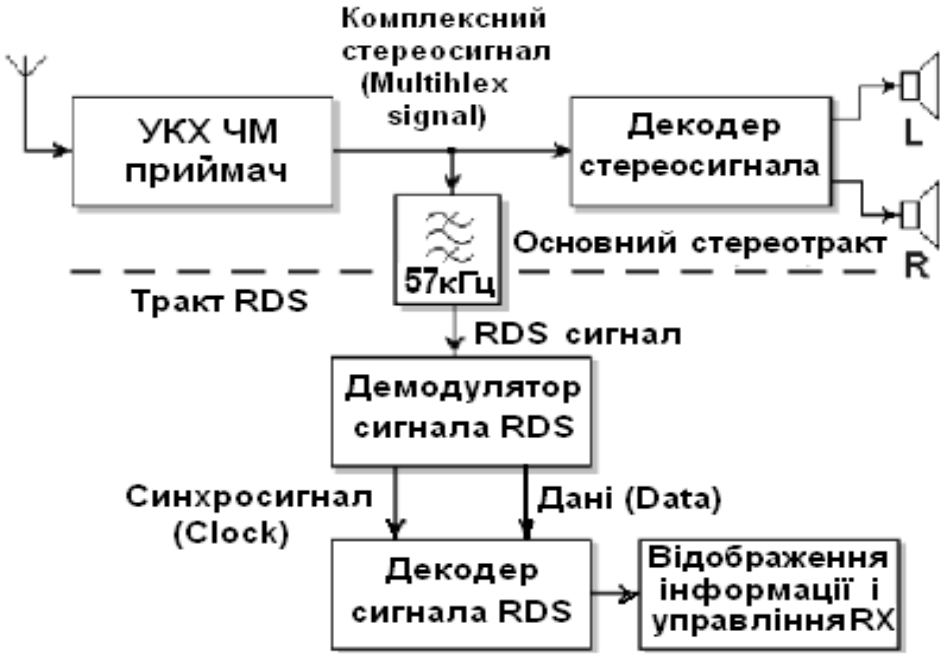


Рис.4.14 – Блок-схема *RDS* УКХ ЧМ-радіоприймача

Ширина необхідної смуги частот ($B_н$) сигналів звукового мовлення з частотною модуляцією розраховується по наступній формулі:

$$B_н = 2 \cdot M + 2 \cdot f_д,$$

де M – максимальна частота модульованих коливань КСС (46,25 кГц – для *OIRT* та 53 кГц – для *CCIR*);

$f_д$ – пікове (максимальне) значення девіації частоти (50 кГц – для *OIRT* та 75 кГц – для *CCIR*).

В діапазоні метрових хвиль передавачі систем звукового радіомовлення формують ЧМ-сигнали чотирьох класів випромінювання:

– ***130KF3EGN*** – монофонічне звукове мовлення за стандартом OIRT;
– ***180KF3EGN*** – монофонічне звукове мовлення за стандартом CCIR;
– ***192K5F8EHN*** – стереофонічне звукове мовлення за стандартом OIRT;
– ***256KF8EHN*** – стереофонічне звукове мовлення за стандартом CCIR.

Контрольні запитання

1. Які основні вимоги і чому пред'являлися розробникам засобів стереомовлення?

2. Поясніть на схемі декодера принцип формування КСС в системах мовлення з полярною модуляцією.
3. Поясніть на схемі декодера принцип формування КСС в системах мовлення з пілот-тоном.
4. Що спільного та чим відрізняються системи аналогового стереомовлення?
5. Які додаткові сигнали і де передбачені для передавання в системі стереомовлення стандарту *CCIR (з пілот-тоном)?*
6. Як розраховується необхідна смуга частот для сигналів аналогового стереомовлення в діапазоні УКХ?

4.3. Системи цифрового звукового мовлення

Цифрове представлення аналогових сигналів

Серед методів цифрового представлення сигналів широко поширена імпульсно-кодова модуляція (ІКМ). При ІКМ аналого-цифрове перетворення (АЦП) складається із трьох операцій:

– дискретизації (за часом);

– квантування (по рівнях);

– кодування квантованих відліків сигналу m-розрядними кодовими комбінаціями.

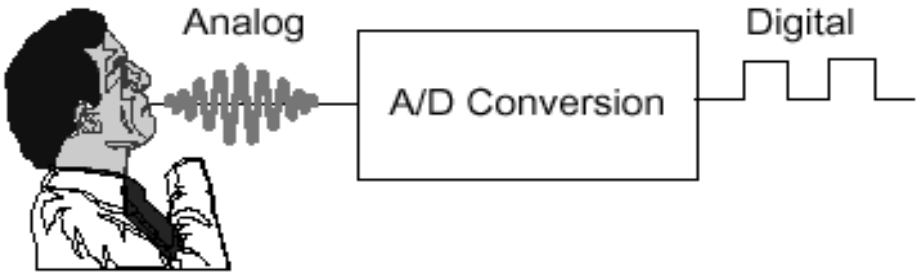


Рис.4.15 – Перетворення аналогового мовного сигналу в цифрову форму

На практиці застосовуються різні АЦП: АЦП послідовних наближень, інтегруючі АЦП тощо, у складі яких можуть бути пристрої вибірки та зберігання.

На першому етапі безперервний аналоговий сигнал, що обмежений по частоті значенням верхньої частоти $F_В$, представляється у вигляді дискретних відліків (АІМ-сигналу), що слідують із частотою дискретизації ($\boldsymbol{f_д = 1/T_д}$), яка за теоремою Котельникова визначається з наступної умови:

$$f_д \geq 2 \cdot F_В.$$

Операція *квантування* полягає в заміні амплітуд АІМ-сигналу найближчими дискретними рівнями квантування, обумовленими амплітудною характеристикою пристрою квантування. Відстань між найближчими рівнями вихідного сигналу квантувача називається *кроком квантування*. Якщо крок квантування між будь-якими рівнями однаковий, то *шкала квантування* називається *рівномірною (лінійною),* а квантувач – *рівномірним (лінійним)*.

На третьому етапі відповідні значення рівнів квантування *кодуються* *m*-розрядним двійковим кодом.

Розглянемо деякі поняття, пов'язані із цифровим перетворенням звуку.

Швидкість передачі цифрового потоку V_b при ІКМ визначається числом двійкових символів (n), переданих за певний проміжок часу Δt. При *одноканальній* передачі зручно обирати для розгляду проміжок часу, який дорівнює періоду дискретизації: $\Delta t = T_д$. За цей час передається одне кодове слово, що містить m двійкових символів. Тоді:

$$\boldsymbol{V_b}\ [\text{біт/с}] = n/\Delta t = m/T_д = m \cdot f_д = \boldsymbol{f_д \cdot \log_2 N},$$

де N – кількість рівнів квантування.

З цієї формули слідує, що швидкість передачі цифрового потоку $\boldsymbol{V_b}$ прямо пропорційна значенню частоти дискретизації ($f_д$), яке вибирають виходячи з компромісу між необхідною якістю звуковідтворення і припустимою швидкістю цифрового потоку. Крім того, частота дискретизації високоякісного звукового сигналу мовлення повинна бути кратна частоті дискретизації телефонного сигналу. Це необхідно було для організації передачі сигналів мовлення по телефонних лініях зв'язку. У зв'язку з цим *для сигналів мовлення частота дискретизації* була обрана рівною ***32 кГц***, що відповідає в чотири рази більшому значенню частоти дискретизації цифрових телефонних систем зв'язку.

Для зменшення шумів квантування необхідно зменшувати крок квантування, що приводить при збереженні динамічного діапазону до збільшення числа рівнів квантування (N), а, отже, і до збільшення розрядності коду (m), що, в свою чергу, призводить до збільшення швидкості передачі цифрового потоку та підвищення вимог до каналу зв'язку. Для виключення цих недоліків застосовують ***нерівномірне*** *(нелінійне)* ***квантування***, крок якого непостійний: для малого рівня сигналу крок квантування малий, а зі збільшенням рівня сигналу крок квантування збільшується. Нерівномірне квантування дозволяє забезпечити високе

відношення сигнал/шум для слабких сигналів і певне його зменшення для сильних сигналів.

Нерівномірний квантувач (НКВТ) може бути побудований на основі *компресора* (КМПР) з нелінійною амплітудною характеристикою $y_к=U_{вих}/U_{вих.макс}$ і рівномірного квантувача (РКВТ) (рис.4.16). Для забезпечення лінійності системи передачі на приймальній стороні необхідно мати *експандер* (ЕКСП) з амплітудною характеристикою $y_е$, протилежною амплітудній характеристиці компресора: $y_к \cdot y_е=1$. Систему шумозниження, до складу якої входять компресор і експандер, як відомо, називають *компандерною системою шумозниження*.

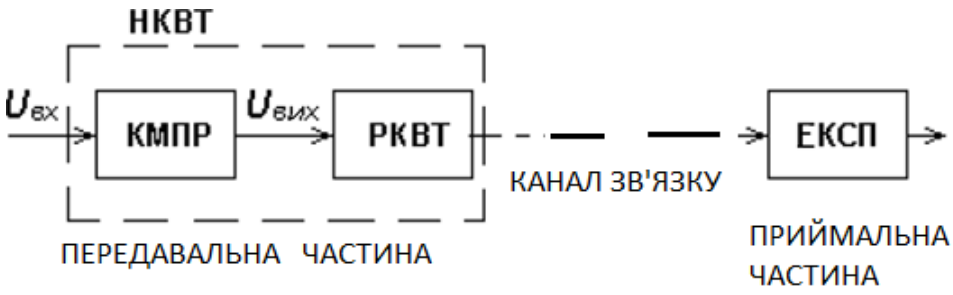


Рис.4.16 – Структурна схема компандерної системи передачі

В сучасних системах зв’язку застосовують цифрові компандери та експандери. Плавна логарифмічна характеристика стиску компандерів замінюється лінійно-ламаною апроксимуючою функцією. Залежно від кількості сегментів при апроксимації і закону стиску квазілогарифмічну лінійно-ламану характеристику компресії позначають буквою та двома цифрами. Наприклад, запис ***μ 15/7*** означає, що використовується *7*-сегментна характеристика стиску по ***μ***-закону при ***μ****=15*. Запис ***A87,6/13*** означає, що використовується *13*-сегментна характеристика стиску по *A*-закону при *A=87,6*. В межах одного сегмента крок квантування постійний, але при переході до наступного зростає. Наприклад, характеристика компресії *A86,7/13* дозволяє зменшити розрядність кодового слова з *14* до *10* (*14/10*) і, як наслідок, *знизити швидкість цифрового потоку* на величину (14-10) : 14 х 100% = **28,6%.**

При цифровому радіомовленні з верхньою частотою модуляції $F_в = 15$ *кГц* використовується частота дискретизації $F_д = 32$ *кГц*. Тоді швидкість цифрового потоку (без обліку додаткових біт для виявлення й виправлення можливих помилок) буде дорівнювати: $V_b=m \cdot F_д=10 \cdot 32=320$ *кбіт/с* при моно та *640 кбіт/с* при стереопередачі. На практиці кодове слово формується в такий спосіб: спочатку визначається полярність сигналу і залежно від неї формується символ першого розряду (*0* або *1*) кодового

слова, потім у двійковому коді кодується номер сегмента, у межах якого перебуває рівень вхідного сигналу.

Для узгодження, наприклад, студійної апаратури *тракту формування програм*, що має більш високу частоту дискретизації $F_д$=*48 кГц* з апаратурою *тракту передачі радіопрограм*, що має $F_д$=*32 кГц*, необхідно провести операцію ***передискретизації*** – зміни частоти дискретизації з *48 кГц* на *32 кГц* (рис.4.17).

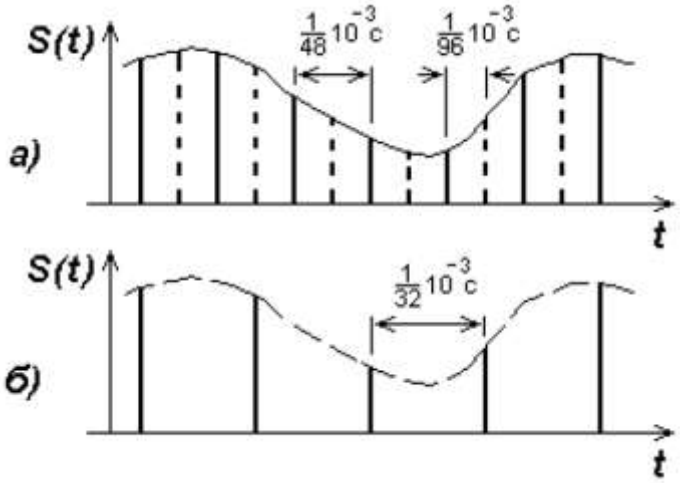


Рис.4.17 – Пояснення процесу передискретизації цифрового сигналу

Передискретизацію можна провести двома способами:

1) перетворити цифровий сигнал в аналогову форму (АЦП), а потім перетворити отриманий аналоговий у цифрову форму (ЦАП) з необхідною частотою дискретизації і кодуванням у новому форматі;
2) зробити перетворення в цифровому сигналі.

При першому способі рівень шуму в перетвореному сигналі виходить більшим через перетворення ЦАП-АЦП. Тому, як правило, використовується другий спосіб.

Спектр реальних звукових сигналів має значний спад в області частот 6…15 кГц. Це призводить до помітного зменшення відношення сигнал/шум квантування в області високих звукових частот у порівнянні з максимальним значенням, оскільки при малому кроці квантування шум квантування виявляється практично рівномірним у смузі частот від нуля до $f_д$/2. Для боротьби з цим явищем при цифровому радіомовленні застосовують ***частотні передспотворення*** аналогового звукового сигналу на стороні передачі і його відновлення після декодування на приймальній стороні (подібно тому, як це відбувається при аналоговому УКВ-ЧМ радіомовленні).

Під ***редукцією аудіо даних*** *розуміють зменшення інформаційної ємності звукового сигналу, що не приводить до появи помітних спотворень*. Редукція аудіоданих дозволяє зменшити швидкість цифрового потоку при кодуванні звукових сигналів.

В цифрових каналах передачі можуть виникати помилки, що виникають під впливом імпульсних завад, недосконалості систем комутації та інших факторів. Помилки в кодовому слові призводять на приймальній стороні системи передачі до помилкового відновлення дискретних відліків, що спотворює вихідний аналоговий звуковий сигнал. Ці спотворення можуть сприймаютися на слух як клацання. Для виявлення й виправлення помилок у цифрових системах високоякісної передачі звуку застосовують ***коригувальні коди***. Надмірність коду позначається наступним чином:

$$R = (n-m)/n = p/n,$$

де n – загальне число символів (бітів) у кодовому слові;

m – число інформаційних символів (бітів) у кодовому слові;

p – число перевірочних символів (бітів) у кодовому слові.

Перемежування символів використовується для захисту від пакетів помилок та *перетворює групові помилки у безліч одиночних помилок*, виправлення яких здійснюють коригувальні коди.

До основних переваг систем цифрового звукового мовлення над аналоговими можна віднести наступне:

– менша чутливість до впливу радіозавад;

– вища ефективність використання радіочастотного ресурсу за рахунок можливості передавання більшої кількості звукових програм в одному блоці;

– менша вихідна потужність передавача для однакових розмірів зон обслуговування;

– можливість забезпечення практично повної корекції спотворень (помилок), що виникають при розповсюдженні радіосигналу;

– висока технологічність обладнання тощо.

В світі використовується велика кількість систем цифрового мовлення, зокрема:

– системи наземного цифрового мовлення, які в свою чергу поділяються за діапазонами частот: у діапазонах до 30 МГц та в діапазонах вище 30 МГц (метрових VHF і дециметрових хвиль UHF);

– системи безпосереднього супутникового цифрового мовлення з прийманням сигналу звичайними побутовими приймачами;

– комбіновані (гібридні) системи.

Найбільше поширення серед систем наземного цифрового радіомовлення знайшли наступні технології:

– система європейського стандарту T-DAB (Terrestrial Digital Audio Broadcasting) в діапазоні вище 30 МГц, яка також називається Eurika-147/DAB;

– система цифрового мовлення в діапазоні до 30 МГц DRM (Digital Radio Mondiale);

– американські системи IBAC та HD Radio (колишня AM IBOC DBS).

Системи *IBOC (In-Band On-Channel)* та *IBAC (In-Band Adjacent Channel)* працюють у діапазонах УКХ-2 *(*88…108 МГц*)* та СХ (525…1608 кГц) і застосовуються тільки в США.

Особливості стандарту DRM

Міжнародний консорціум *DRM* розробив цифровий стандарт для радіомовлення в діапазонах ***до 30 МГц***. Система ***DRM*** (*Digital Radio Mondiale*) придатна як для регіонального, так і для національного мовлення і навіть іномовлення та може бути використана для стаціонарного, переносного та рухомого зв’язку.

Формат стандарту характеризується гнучкими параметрами передачі, які дозволяють використовувати його у всіх діапазонах нижче 30 МГц. Одночасно він може використовуватися і для діапазону УКХ – ***DRM+.*** Передбачалося, що перші системи *DRM* будуть працювати в стандартній смузі радіоканалу – 9 кГц або 10 кГц, а згодом – з можливістю формувати і більш широкі потоки, підвищуючи якість передачі сигналу. Таким чином, при переході на *DRM*-мовлення у КХ-діапазоні не потрібно міняти міжнародний план розподілу радіочастот. Стандарт *DRM* знаходить сильну підтримку в тих країнах, де *FM*-ефір вже заповнений.

Основні переваги систем *DRM* наступні:

– покращення приймання та якості звучання;

– можливість використання у всіх діапазонах;

– можлива спільна передача даних та аудіосигналу;

– є вибір режимів для оптимізації пропускної здатності, якості та надійності приймання;

– дуже висока ефективність використання спектра – від 3 до 4 біт/Гц/с.

Система відкрита для наступного покращення та вдосконалення – застосування нових методів компресії, процесів кодування, модуляції тощо. Радіочастотні канали для радіомовлення в діапазонах нижче 30 МГц використовують ширину смуги частот 9 або 10 кГц.

Основні характеристики стандарту *DRM:*

– на відміну від стандарту DAB, що використовує MPEG-2, в DRM застосовується більш сучасний варіант компресії – MPEG-4 з алгоритмами кодування аудіосигналу AAC (Advanced Audio Coding) у моно- і стереоформатному варіантах, а також CELP (Code Exited Linear Prediction) для високоякісного кодування мови;

– в MPEG-4 довгострокове пророкування проводиться не в часовій, а в спектральній площині;

– кодер підтримує декілька нових механізмів, пов'язаних із здатністю цифрового потоку адаптуватися до змін параметрів каналу, а також може доповнюватися технологією SBR (Spectral Band Replicatoin) для підвищення якості передачі верхніх частот звуку;

– крім аудіосигналів, у цифровому потоці можуть передаватися дані;

– в DRM, як і в DAB, застосовується система модуляції COFDM (близько 200 несівних частот), яка досить ефективна для боротьби з негативними наслідками багатопроменевого поширенням радіохвиль і селективними завмираннями сигналу, які характерні для діапазону коротких хвиль;

– можуть використовуватися наступні види модуляції: 64QAM, 16QAM та 4QAM;

– система передбачає використання наступних частотних каналів:

– із смугою частот 9 або 10 кГц;

– із смугою частот 4,5 або 5 кГц;

– із смугою частот 18 або 20 кГц (для більш якісного мовлення).

Структура каналів в стандарті DRM:

– мультиплексований потік аудіо та даних формують основний сервісний канал MSC (Main Service Channel), в якому передається до 4 потоків, кожний з яких містить аудіо або дані;

– додаткові (сервісні) канали (FAC та SDC):

– перший додатковий канал FAC (Fast Access Channel – канал швидкісного доступу) – містить данні про параметри радіочастотного сигналу (ідентифікатор потоку, ширина займаної смуги, тип модуляції, тип кодування, індекс глибини

перемежування, кількість переданих послуг тощо) та інформацію, що дозволяє виділяти окремі послуги;

– другий додатковий канал SDC (Service Description Channel – канал опису послуг) – містить інформацію, що відноситься до умовного доступу, програму передач, інформацію про авторські права, допоміжну інформацію для деяких додатків, а також посилання на альтернативні частоти, на яких передається той же канал.

Кількість несівних частот *COFDM* (в смузі частот шириною 10 кГц може використовуватися від 88 до 226 несівних), тривалість символів захисного інтервалу залежать від характеру поширення радіохвиль, відстані між передавачем і приймачем та рівня завадозахищеності (розрізняють 4 рівня: *A, B, C, D*).

На відміну від більшості інших нових цифрових стандартів, під *DRM* не було виділено нових частотних ділянок та не були збільшені границі вже наявних діапазонів ДХ, СХ та КХ.

З 2005 року, альянс *DRM* вивчав можливість використання УКХ і *FM* діапазонів (від 30 до 108 МГц). Застосування більш широкої смуги частот дозволяє збільшити інформаційну ємність каналу. Так в смузі частот шириною 50 кГц можливо отримати близьку до *CD* якість аудіосигналу (з бітрейтом до 350 кбіт/с), а в смузі 100 кГц – вже є можливість передавати телевізійне зображення стандартної чіткості на мобільні приймачі, як в технологіях *DMB* і *DVB-H.* 31 серпня 2009 року стандарт ***DRM+*** був офіційно прийнятий в якості цифрового радіомовного стандарту і була опублікована його технічна специфікація. *DRM+* є останньою версією стандарту *DRM* і включає як традиційний режим для діапазону до 30 МГц, так і розширення для використання в смузі частот від 30 до 174 МГц.

Рис.4.18 – Приклади радіоприймачів стандарту DRM

Системи стандарту DAB

Система цифрового звукового радіомовлення ***DAB*** (*Digital Audio Broadcasting*) була створена в рамках проекту “Еврика-147”, виконавцями якого були близько 50 фірм із Німеччини, Англії, Франції, Голландії, Норвегії, Швейцарії, Швеції, Італії, Фінляндії, Японії, Канади й інші.

Поняття ***T-DAB (Terrestrial*** *Digital Audio Broadcasting)* відносить цей стандарт до *цифрового* ***наземного*** *ефірного радіомовлення*.

Особливості систем стандарту *DAB:*

– радіосигнал системи DAB займає смугу частот близько 1,54 МГц (по рівню -26 дБ) і може передаватися в діапазоні частот від 30 МГц до 3 ГГц наземними та супутниковими передавачами, а також по кабельних мережах;

– для системи DAB характерна висока ефективність використання радіочастотного спектра (у смузі всього лише 1,54 МГц можлива, наприклад, передача шести високоякісних стереофонічних програм і додаткової різноманітної інформації – текстів, інформації для водіїв автотранспорту, зображень газет і географічних карт у кольоровій формі тощо);

– система забезпечує повну ідентифікацію програм і передавачів;

– передавачі системи DAB мають значно меншу потужність у порівнянні із ЧМ-передавачами, що обслуговують однакову за розміром територію;

– є можливість створення одночастотної мережі (робота всіх передавачів на одній частоті – синхронне радіомовлення) на дуже великих територіях, забезпечуючи при цьому значну економію радіочастотного спектра;

– приймання програм можливе ненаправленими штировими антенами в домашній обстановці, рухомому автомобілі, похідних умовах, що обумовлено високою стійкістю системи DAB до завад різного виду, і зокрема до спотворень сигналу через багатопроменеве поширення радіохвиль, що особливо важливо для міських районів з багатоповерховою забудовою;

– застосовується компресія даних ***MPEG-2,*** а в версії ***DAB+*** – кодек ***HE-AAC*** *(*англ. *High-Efficiency Advanced Audio Coding — високоефективне вдосконалене аудіокодування)(MPEG-4 Audio (Part3*));

– в системі можлива оперативна зміна конфігурації мультиплексування переданих звукових сигналів (як монофонічних, так і стереофонічних) і додаткової інформації (забезпечуються наступні швидкості передачі цифрових звукових сигналів: 32, 48, 56, 64, 80, 96, 112, 128, 162, 192 кбіт/с на один канал; число каналів звукового мовлення в багатопрограмному груповому цифровому потоці може мінятися від 20 монофонічних при невисокій якості до 4 стереофонічних зі студійною якістю).

Параметри системи DAB залежать від *режиму передачі* і можуть оперативно змінюватися (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Параметри системи *DAB* для різних режимів передачі

Параметр	**Режим 1**	**Режим 2**	**Режим 3**	**Режим 4**
Сумарна швидкість передачі даних, Мбіт/с	2,4	2,4	2,4	2,4
Ширина частот радіоканалу, МГц	1,536	1,536	1,536	1,536
Кількість несівних частот (n)	1536	768	384	192
Рознесення несівних частот, кГц	1	2	4	8
Тривалість *COFDM*-символу (T_S), мкс	1000	500	250	120
Тривалість захисного інтервалу між *COFDM*-символами (T_G), мкс	280	140	70	40
Період проходження *COFDM*-символу (T_{SG}), мкс	1280	640	320	160
Тривалість кадру (T_K), мс	96	48	24	24
Кількість *COFDM*-символів у кадрі($m=T_K/T_{SG}$)	75	75	75	150
Кількість бітів за один *COFDM*-символ ($2n$)	3072	1536	768	384
Максимальна частота радіоканалу, МГц	< 375	< 750	< 1500	< 3000
Максимальна відстань між передавачем при роботі в одночастотній мережі ($D_{max} \leq C \cdot T_G$), км	84	42	21	12

Спрощена структурна схема передавальної частини системи DAB наведена на рис.4.19. Цифрові аудіоданні різних програм (Р I, Р II,…), що мають частоту дискретизації 48 кГц і роздільну здатність 16 біт/відлік (бітова швидкість $f_b=16 \cdot 48$ кГц=768 кбіт/с на один канал), проходять редукцію по методу *MUSICAM* у кодерах *MPEG* 11172-3. При цьому швидкість цифрових потоків кожного з каналів програм зменшується з *768* до 96 кбіт/с. Для захисту програм аудіоданих від помилок у кодерах *MPEG* використовуються *CRC*-коди, надмірність яких може коливатися від *R=35%* (нижчий захисний рівень) до *R=75%* (вищий захисний рівень).

Сигнал даних (ДД) також захищається від помилок *CRC*-кодами в *кодері додаткових даних* (ДД-кодер). Для захисту від пакетних помилок використовується канальне часове перемежування в блоках ПРЖ.

Після перемежування цифрові потоки надходять на *головний службовий мультиплексор* (*МХ – main service MultipleX*), роботою якого управляє *контролер мультиплексування* (КМХ), який задає певні конфігурації мультиплексування. За допомогою *МХ* у цифровий потік додаються *дані каналу синхронізації* (ДКС), *дані конфігурації мультиплексування* (ДКМ), *дані сервісної інформації* (ДСІ). ДСІ дозволяють в приймачі ідентифікувати передавач, визначити вид переданих програм (спорт, новини, музика тощо). ДКС, ДКМ і ДСІ не перемежовуються в часі й, отже, не мають часової затримки. Їх називають *каналом швидкої інформації* (КШІ або *FIC – Fast Information Cannel*).

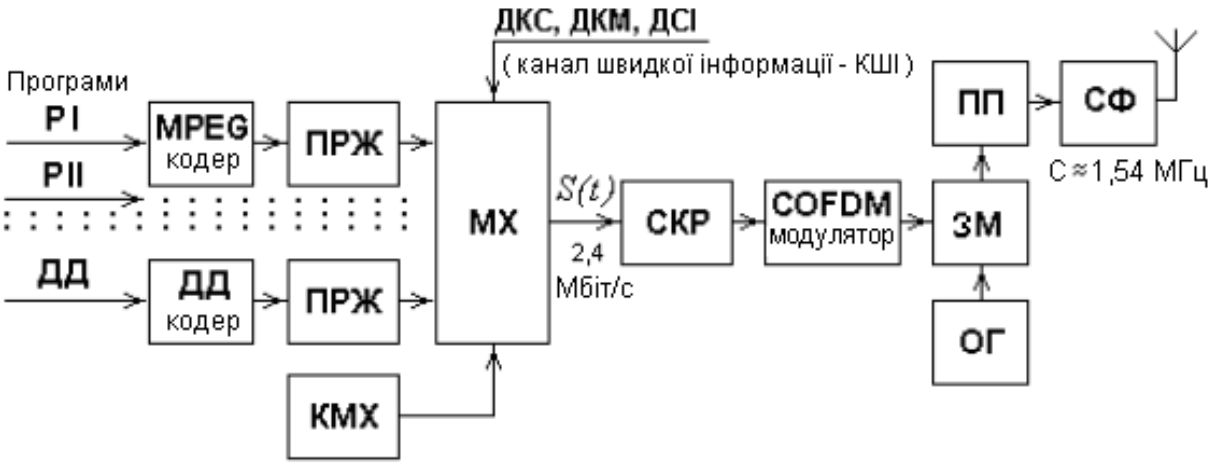


Рис.4.19 – Структурна схема передавальної частини системи *DAB*

Цифровий потік *S(t)* з виходу *МХ* піддається шифруванню *в скремблері* СКР (крім бітів ДКС) і надходить на *COFDM*-модулятор (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing – ортогональний частотний розподіл каналів з кодуванням*). Після модуляції *COFDM*-сигнал за допомогою *опорного генератора* (ОГ) і *змішувача* (ЗМ) переноситься в певний частотний діапазон, підсилюється *підсилювачем потужності* (ПП), фільтрується *смуговим фільтром* (СФ) і надходить в антену передавача.

Структурна схема приймача системи *DAB* наведена на рис. 4.20. Радіотракт приймача має смугу пропускання $П_{0,7}=\Delta f_{COFDM}=1{,}54$ *МГц*. *COFDM*-демодулятор містить у своєму складі 1536 когерентних демодуляторів *DQPSK*-сигналу, з яких, наприклад, при використанні *режиму передачі 2* задіяне 768 (рис.4.21).

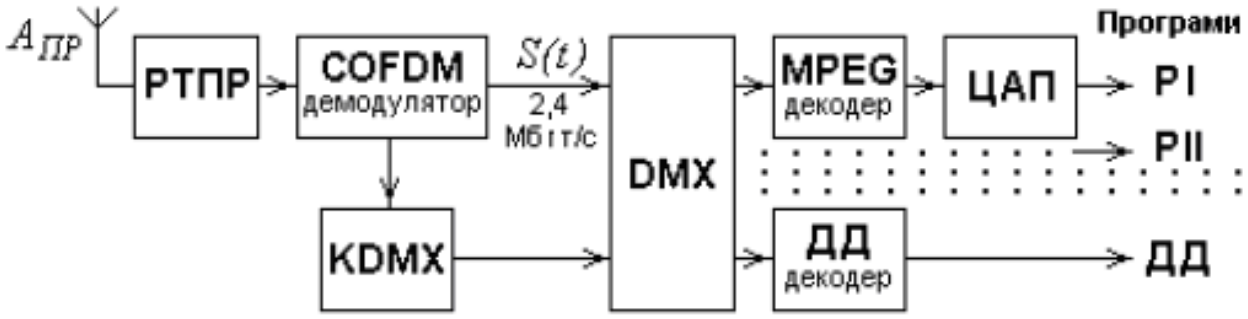


Рис.4.20 – Структурна схема приймача системи *DAB*

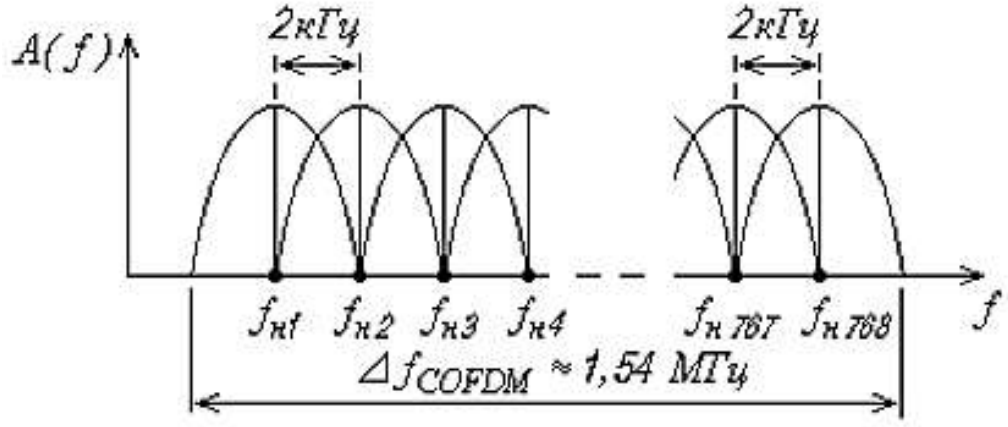


Рис.4.21 – Спектр *COFDM*-сигналу з *768* ортогональними несівними частотами (*режим передачі 2*)

На виході *COFDM*-демодулятора утворюється цифровий потік *S(t)* зі швидкістю 2,4 Мбіт/с. За допомогою демультиплексора (*DMX)*, який керується *контролером демультиплексора* (*KDMX*), цифровий потік *S(t)* поділяється на цифрові потоки звукових програм і сигнал даних. Після декодування *MPEG*-декодерами проводиться цифро-аналогове перетворення (ЦАП). Сигнал додаткових даних декодується в ДД-декодері.

Нині європейською організацією *CEPT* прийнято рішення про використання для систем *T-DAB* переважно смуг частот діапазону ДВЧ (*Band III*) – від 174 до 230 МГц, від 230 до 240 МГц (рис.4.22) та нижньої частини УВЧ (*L-Band*) – від 1452 МГц до 1492 МГц. Відповідно до угоди “Вісбаден-95” Україні були виділені частоти для 25 зон частотного планування цифрового звукового мовлення в діапазоні 230…240 МГц та 1452…1492 МГц, в 2006 р. на РКР-06 – додатково в діапазонах 47…68 МГц та 174…230 МГц.

DAB DIGITAL RADIO FREQUENCES & CHANNELS	
DAB CHANNEL	FREQUENCY MHZ
5A	174.928
5B	176.640
5C	178.352
5D	180.064
6A	181.936
6B	183.648
6C	185.360
6D	187.072
7A	188.928
7B	190.640
7C	192.352
7D	194.064
8A	195.936
8B	197.648
...	
12D	229.072
13A	230.784
13B	232.496
13C	234.208
13D	235.776
13E	237.448
13F	239.200

Рис.4.22 – Частотні канали для мереж стандарту *DAB* в діапазоні ДВЧ (*Band III*)

За принципом організації мережі *DAB* бувають:

– синхронні (*SFN – Single Frequency Network*);
– багаточастотні (*MFN*).

Зони синхронного мовлення є найбільш оптимальними та створюються шляхом застосування одного основного передавача потужністю до 2 кВт і кількох (до 10…15) малопотужних (до 100 Вт) передавачів. При цьому радіус однієї зони синхронного мовлення – до 100 км.

В мережах *DAB+* станції об'єднані в «мультиплекс», у кожному з яких може бути транслюватися до 16 радіомовних станцій.

Наприклад, в Києві мовлення за технологією *DAB+* здійснюється на частотному каналі ***11D*** (центральна частота – 222,064 МГц) у форматі *HE-AAC* з бітрейтом 64 кбіт/с. Технічно мовлення здійснює *Концерн РРТ*, використовуючи 1 передавач (вул. Дорогожицька) (рис.4.23).

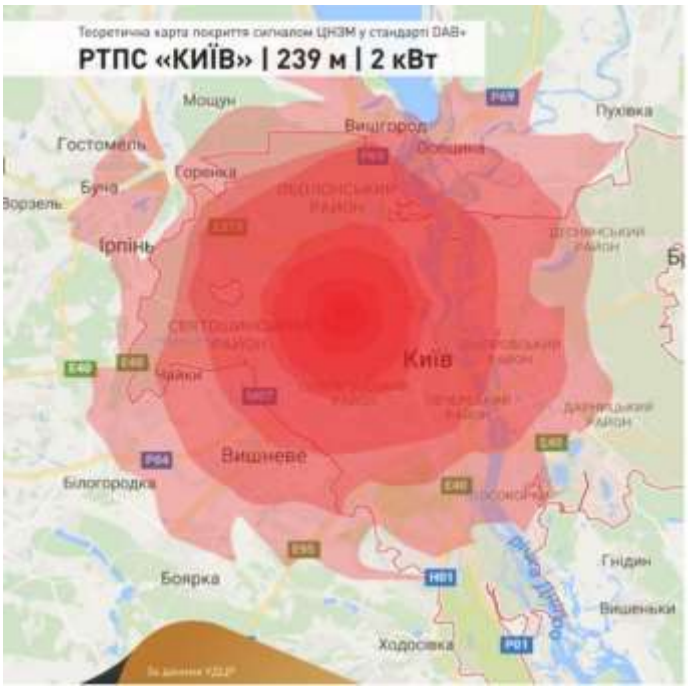


Рис.4.23 – Приклад радіопокриття радіомовного передавача в стандарті *DAB+* в м. Києві

2019 рік приніс черговий рекорд для стандарту цифрового радіомовлення *DAB* – це був рік, коли цифровий *DAB*-приймач був встановлений в стандартній комплектації 2,38 млн. нових автомобілів. Розширюється асортимент стаціонарних і переносних цифрових радіомовних приймачів (рис. 4.24).

Рис.4.24 – Приклади цифровий радіомовний приймачів стандарту *DAB*

Крім того, для приймання програм в стандарті *DAB* можливо використовувати *SDR*-приймачі (рис.3.59, 3.60) з відповідним програмним забезпеченням (рис. 4.24).

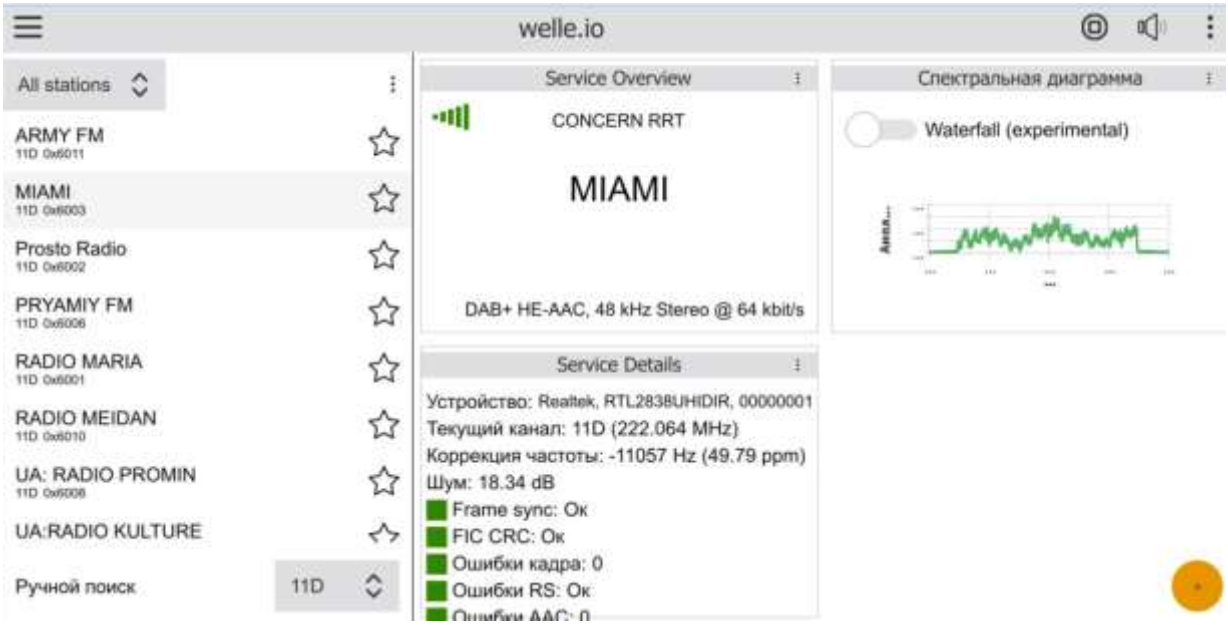


Рис.4.24 – Приклад застосування програми *Welle.io* для приймання програм в стандарті *DAB(DAB+)*

Контрольні запитання

1. Основні етапи аналого-цифрового перетворення та його особливості для сигналів звукового мовлення.
2. Яке призначення нерівномірного квантування.
3. Які особливості передискретизації цифрових сигналів мовлення.
4. Які технології цифрового наземного радіомовлення знайшли найбільшого застосування та для яких діапазонів частот?
5. В чому полягають переваги та основні характеристики стандарту *DRM*?
6. Основні характеристики стандарту *DAB*?
7. Чим відрізняються режими роботи систем *DAB* та від чого залежить їх застосування?
8. З яких основних елементів складаються передавальний та приймальний тракти системи *DAB*?
9. Які частотні діапазони використовують для радіомовлення в стандарті *DAB*?
10. Яким чином здійснюється приймання радіомовних програм в стандарті *DAB?*

4.4. Особливості систем телемовлення

Загальні положення та класифікація

Телебачення (від грец. τῆλε-«далеко» + лат. *video*-«бачити») – є *загальним терміном, що охоплює технології та практичну діяльність, пов'язану з передачею на відстані рухомих зображень зі звуковим супроводом.* Телебачення є потужним засобом комунікації та масової інформації.

Такі системи можуть реалізуватися на технологічній базі різних рівнів – від найпростіших аналогових до сучасних цифрових систем із високим ступенем інтелектуалізації. В них можуть сполучатися функції відтворення зображень, звуку і виконання інших операцій, наприклад, у спеціалізованих прикладних системах – розпізнавання образів тощо.

Види телевізійного мовлення можна класифікувати по ряду ознак: колір зображення (чорно-біле та кольорове), наявність стереоефекту, інтерактивність тощо).

На рис. 4.23 наведено класифікацію систем телебачення (ТБ) за типом представлення відеосигналу – цифрового або аналогового й типів цих систем, на рис. 4.24 наведено класифікацію композитних систем аналогового кольорового телебачення.

Композитні системи – це системи *SECAM, PAL* і *NTSC*, які використовуються в аналоговому кольоровому телемовленні. Всі три системи є сумісними із системою чорно-білого телебачення та відрізняються способом передавання інформації про колір зображення. Параметри і характеристики цих систем визначено в Рекомендації *ITU-R BT*.470. Відповідно до цієї Рекомендації, композитні системи відповідають стандартам передавання телевізійних сигналів *B, D, D1, G, H, K, K1, I, M, N.*

До систем *телебачення підвищеної якості* (ТБПЯ) належали покращені варіанти систем *SEKAM, PAL і NTSC*, які були сумісними з ними – системи *ENHANCED SECAM, PALplus* та *ENHANCED NTSC (CLEAR VISION),* а також системи сімейства *MAC (A-MAC, B-MAC, C-MAC, D-MAC, D2-MAC).*

На зміну аналоговим системам прийшли системи цифрового телебачення, які мають безперечні переваги перед аналоговими системами, у тому числі:

– можливість цифрового кодування аудіовізуальної інформації зі стисненням, ступінь якого для відеосигналу сягає десятків і сотень разів, і, як наслідок, реалізація нових рівнів якості телевізійного мовлення, не змінюючи потрібного канального ресурсу, традиційного для аналогового телебачення;

– гнучкість, а саме, за рахунок керування параметрами, які передаються у цифровому потоці, та зміни структури і змісту інформації, що передається, можливість керування типом системи та її основними характеристиками;

– відсутність накоплення завад і спотворень за рахунок використання завадостійкого канального кодування, що дозволяє в зоні впевненого приймання організувати високоякісне мовлення;

– можливість організовувати комп'ютеризоване програмне виробництво з використанням алгоритмів цифрового оброблення і збереження сигналів телевізійних програм.

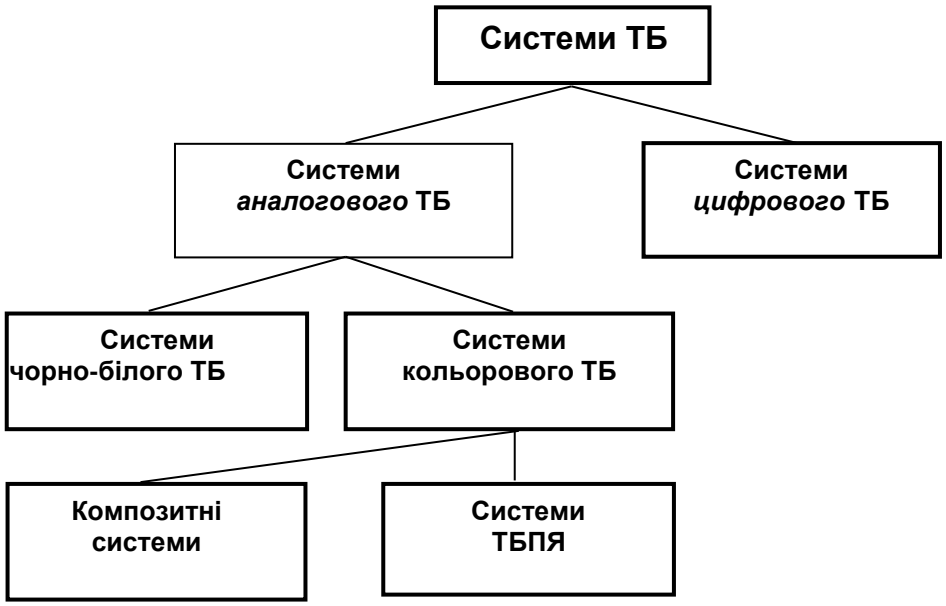


Рис. 4.23 – Класифікація систем ТБ за типом представлення відеосигналу і типів цих систем

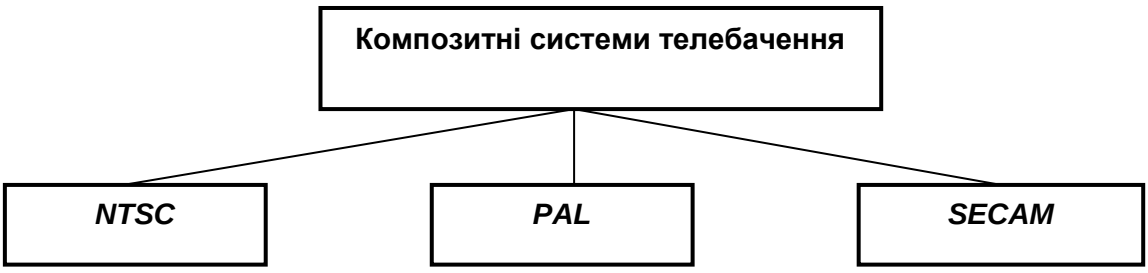


Рис.4.24 – Класифікація композитних систем ТБ

В цифрових системах використовується наступна роздільна здатність зображення:

– ТБОЧ (*LDTV – Limited Definition Television*) – телебачення обмеженої чіткості з приблизно вдвічі меншою чіткістю стосовно стандартного);

– ТБСЧ (*SDTV – Standard Definition Television*) – телебачення стандартної чіткості – 720 × 576 або 720 × 480 активних елементів зображення відповідно для європейського та американського стандартів розгортання згідно з Рекомендацією ITU-R BT.601.A;

– ТБПЧ (*EDTV – Enhanced Definition Television*) – телебачення підвищеної чіткості – 960 × 576 або 960 × 480 активних елементів зображення відповідно для європейського й американського стандартів розкладання згідно з Рекомендацією ITU-R BT.601.B;

– ТБВЧ (*HDTV – High Definition Television*) – телебачення високої чіткості – 1920 × 1080 активних елементів зображення згідно з Рекомендацією ITU-R BT.709; використовують наступні формати: HD Ready – 1280×720 елементів та Full HD – 1920 × 1080;

– ТБНВЧ (*UHDTV – Ultra High Definition Television*) – телебачення надвисокої чіткості, яке реалізується на декількох рівнях. Розрізняють наступні види роздільної здатності зображення:

– 2K – 2048 × 1080 елементів;
– 4K(*UHDTV*-1) – 3840 × 2160 елементів;
– 8K (*UHDTV*-2) – 7680 × 4320 елементів.

Узагальнена структурна схема телевізійної системи

Телевізійна система *є сукупністю оптичних, електронних і радіотехнічних пристроїв, що використовуються для передачі на відстань рухомих зображень*. Передача зображень здійснюється електричним способом, тобто оптичне зображення спочатку перетворюються в електричний сигнал, що передається по каналу зв’язку, який потім в місці прийому знов перетворюються в оптичне зображення.

В основі телебачення лежать 3 фізичних процеси:

– перетворення світлової енергії в електричні сигнали;
– передача та приймання електричних сигналів по каналу зв’язку;
– перетворення електричних сигналів в оптичне зображення.

Узагальнена схема системи телебачення, пристрої та їх взаємозв’язок представлені на рис.4.25.

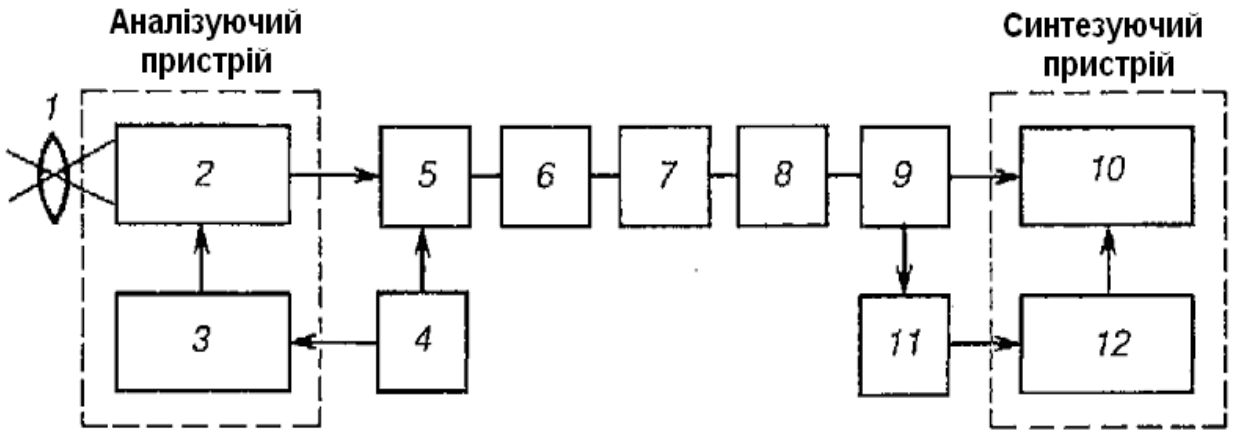


Рис. 4.25 – Структурна схема телевізійної системи:

1 – об'єктив; *2* – оптико-електронний перетворювач; *3* – розгортаючий пристрій; *4* – синхронізатор; *5* – підсилювач; *6* – передавальний пристрій; *7* – канал зв'язку; *8* – приймальний пристрій; *9* – відеопідсилювач; *10* – перетворювач сигнал-світло; *11* – селектор імпульсів синхронізації; *12* – розгортаючий пристрій.

Об'єктив ***1*** перетворює світловий потік, створюючи оптичне зображення сцени на світлочутливій поверхні оптоелектронного перетворювача ***2***. Цей пристрій перетворює світлову енергію в електричну.

Оптичне зображення проектується на твердотільный датчик телевізійних сигналів, з якого знімаються заряди, які згодом утворюють ТВ сигнал. За допомогою *розгортаючого* пристрою ***3*** одержують послідовні електричні імпульси, що несуть інформацію про яскравість та колір зображення.

Для синхронної та синфазної роботи аналізуючих і синтезуючих пристроїв, що забезпечують ідентичність положення координат точок на передавальному і приймальному пристроях, необхідно генерувати і передавати спеціальні сигнали синхронізації. *Синхронність* досягається при рівності частоти розгорнень на аналізуючому і синтезуючому пристроях, а *синфазність* – при точному початку їх роботи. Для виконання цих умов у телебаченні використовується примусова синхронізація. Сигнали синхронізації генеруються в синхрогенераторі ***4*** і являють собою імпульси різної тривалості і частоти, які надходять у *розгортаючий пристрій* ***3***, а також у підсилювач ***5***, де підсумовуються із *сигналом яскравості* та передаються в канал зв'язку *передавальним пристроєм* ***6***.

У приймальному пристрої ***8*** відбувається підсилення телевізійного радіосигналу по високій і проміжній частотах, а також його детектування. Після детектування відеосигнал надходить на підсилювач відеосигналів **9**, де відбувається підсилення сигналу до необхідної величини для керування

перетворювачем сигнал-світло (телевізійний екран) ***10***, і на селектор імпульсів синхронізації ***11***, в якому здійснюється виділення із відеосигналу імпульсів синхронізації. Ці імпульси управляють *розгортаючим* пристроєм ***12***, забезпечуючи синхронність і синфазність руху сканування елементів зображення аналізуючих і синтезуючих пристроїв.

Перетворення оптичного зображення в електричний сигнал

Для сприйняття навколишнього реального миру природа наділила людину п’ятьма почуттями, три з яких (зір, слух, нюх) є *дистантними*, а два (дотик і смак) – *контактними*.

Фізіологи затверджують, що 80...85 % усіх відчуттів людина сприймає через зір. Але ми бачимо малу частину нашого безпосереднього оточення, і тільки те, що *випромінює* або *розсіює* падаюче світло, яке, як відомо, займає досить вузький діапазон електромагнітних коливань.

Видима частина спектра лежить в області оптичного діапазону та становить лише вузьку ділянку (**380...760 нм**). На цій ділянці розміщаються всі видимі кольори: від фіолетового до червоного (рис. 4.26а). На рис. 4.26б зображена крива відносної спектральної чутливості ока, або, як іноді її називають, стандартна крива відносної видимості ока. Максимальна спектральна чутливість ока перебуває в області жовто-зеленої частини видимого спектра частот (0,55 мкм). Ліворуч і праворуч від максимуму, де розташовуються сині та червоні кольори, спектральна чутливість ока зменшується.

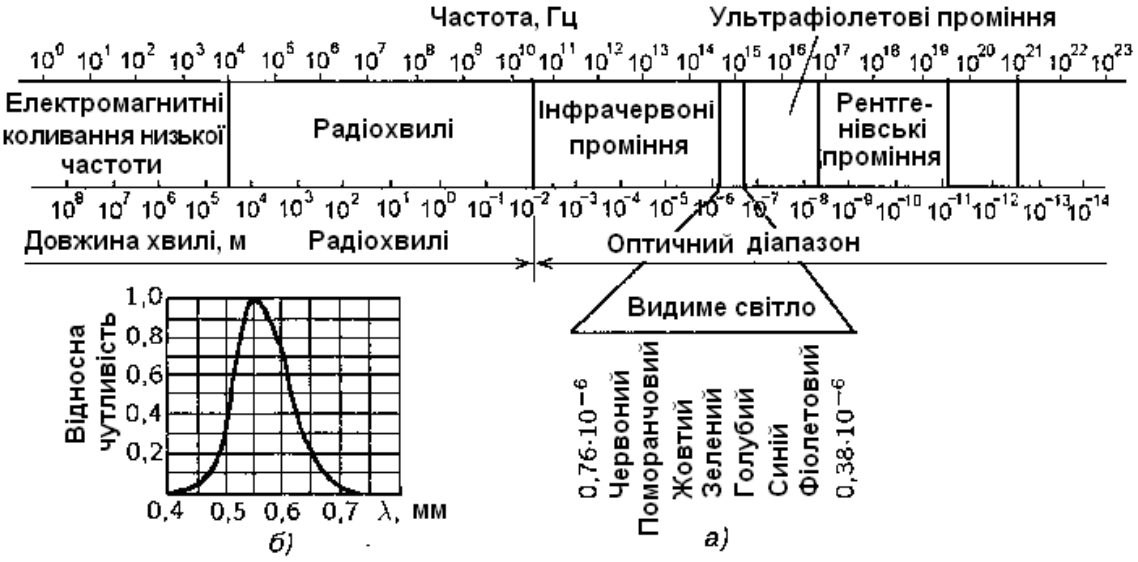


Рис. 4.26 – Спектр електромагнітних хвиль (а) і стандартна крива відносної спектральної чутливості ока (б)

Отже, око людини не всі кольори видимого діапазону розрізняє однаково. Ця обставина була врахована при створенні сумісних систем кольорового телебачення.

Принципи передачі рухомих зображень

Зображення, яке нам демонструє телевізор, – це ілюзія, що виникає завдяки інерційності нашого зору. Насправді в кожний момент часу на екрані присутня лише одна єдина точка – один елемент зображення, але завдяки *розгортки – процесу швидкого переміщення світлової точки по екрану* – телевізор створює оптичне зображення.

В основі телебачення застосовуються **два принципи:**

1. Розбиття зображення на екрані датчика телевізійного сигналу на окремі елементи (просторова дискретизація зображення);
2. Послідовна у часі передача інформації (яскравості та кольору) кожного з елементів зображення по каналу зв'язку (визначається правилом розгортки зображення).

Розгортка *– це процес послідовної, почергової передачі елементів зображення*. При виборі типу розгорнення для телевізійних систем необхідно забезпечити наступне:

- однаковий час передачі кожного елемента;
- мінімальні втрати на зворотний хід;
- простоту технічної реалізації.

Усім цим вимогам найбільше повно відповідає ***лінійна розгортка,*** яка буває:

- черезрядкова;
- прогресивна (порядкова).

Крім того, розрізняють два види розгортки:

- горизонтальну – рядкову;
- вертикальну – кадрову.

Причому, за напрямок руху розгортаючого елемента прийнятий рух ліворуч – праворуч *для рядкової розгортки* (РР) і зверху вниз для *кадрової* (КР), а зображення на екрані телевізора можна отримати тільки при спільній роботі цих розгорток.

При роботі розгортки розрізняють *прямій і зворотний хід*. Під час прямого ходу відбувається зняття або відображення відеоінформації (активна частина), при цьому промінь рухається праворуч для РР і зверху вниз для КР, а при зворотному ході (пасивна частина) вертається назад (рис.4.27).

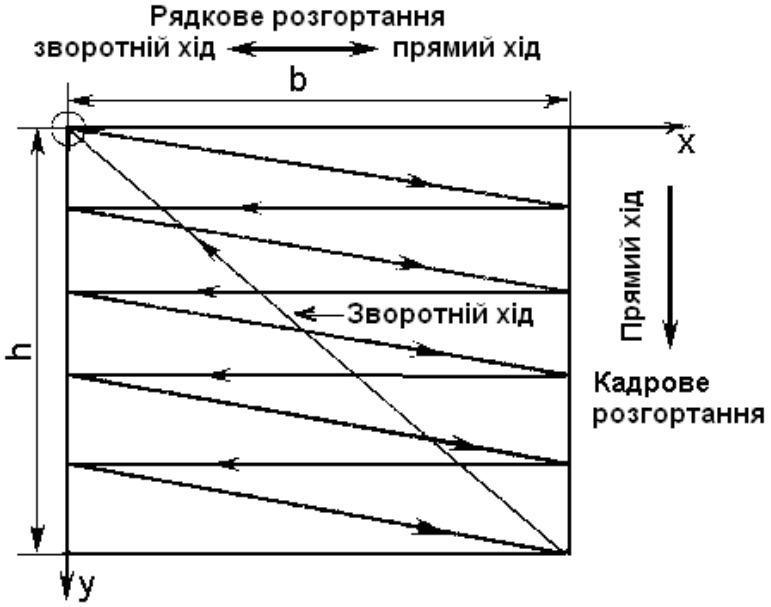


Рис.4.27 – Лінійна розгортка

При частоті кадрів 50 Гц і кількості рядків розгортки 625 (прогресивна розгортка) – рис. 4.28а**,** смуга частот ТВ сигналу займає близько ***13 МГц***. Тому для зменшення необхідної смуги частот каналу було вирішено використовувати ***черезрядкову розгортку,*** в якій ТВ кадр передається за 2 напівкадру (поля – парного та непарного), у кожному з яких передається половина рядків, як показано на рис.4.28б. Причому, у першому напівкадрі відбувається передача непарних рядків, а в другому – парних. *Частота полів вибирається* рівною 50 Гц, а повний кадр має частоту 25 Гц і, хоча в кожному напівкадрі відображається лише половина рядків, за рахунок інерційності зору зображення двух напівкадрів сприймається разом як один кадр. При цьому смуга частот каналу знижується вдвічі – до ***6.5 МГц***.

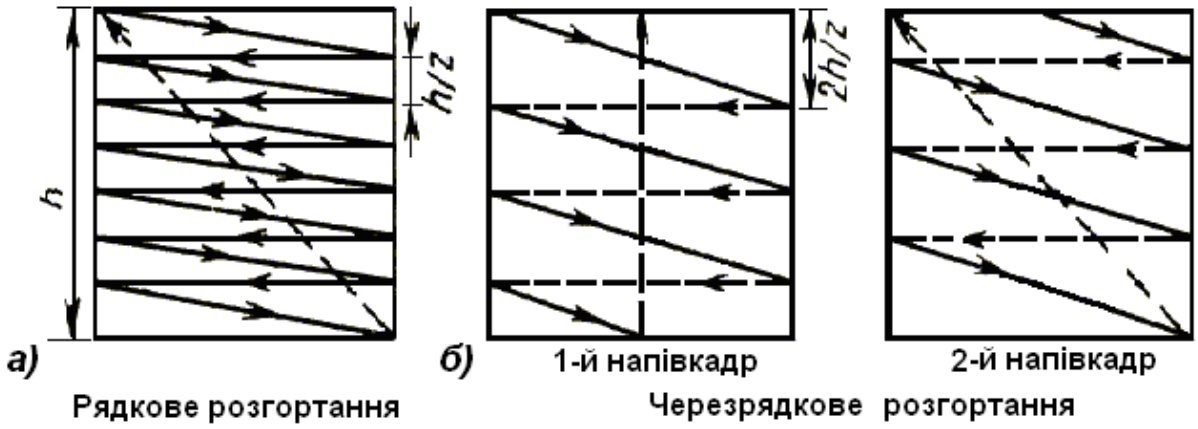


Рис. 4.28 – Варіанти лінійної розгортки

Структура телевізійного сигналу

В загальному випадку, *телевізійний сигнал – це сукупність електричних сигналів, що містять інформацію про телевізійне зображення та звук.*

Телевізійний сигнал зображення являє собою сукупність сигналів, що забезпечують передачу:

- геометричної форми та відносних розмірів об’єктів зображення;
- розподілу яскравості зображення;
- колір предметів.

Величина (рівень) відеосигналу на виході фотоелектричного перетворювача, є функцією часу та пропорційна яскравості переданих елементів зображення. Наприклад, для чорно-білого зображення (рис. 4.29), високий рівень сигналу відповідає білому кольору, низький рівень – чорному кольору, а проміжні рівні сигналу – градаціям сірого.

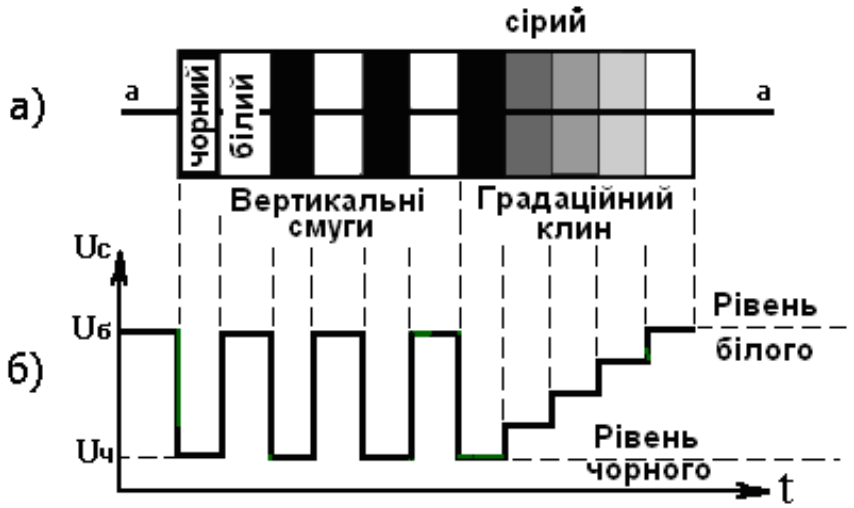


Рис.4.29 – Формування відеосигналу

а) зображення, що передається; б) форма сигналу при розгортці рядка *а-а*

До складу *повного телевізійного сигналу (ПТВС)* входять наступні компоненти:

1) відеосигнал (сигнал яскравості);
2) рядкові і кадрові імпульси гасіння;
3) рядкові й кадрові синхронізуючі імпульси.

У ПТВС розрізняють:

– активний інтервал, протягом якого передається інформація про зображення;

– пасивний інтервал, у якому передаються імпульси синхронізації та гасіння, сигнали визначення кольору, телетексту, тест-сигнали зображення та інші сигнали.

Для передачі *звукового супроводу* телевізійного зображення в більшості аналогових ТВ систем використовується *частотна модуляція*, як це використовується в системах радіомовлення для УКХ діапазону. Крім того, використовується система цифрового стерео супроводу *NICAM.*

Спектральний склад телевізійного сигналу

Характерною особливістю телевізійного сигналу є широкий діапазон частот, який займає відеосигнал. Спектр частот відеосигналу Δf визначається різницею між верхньою $f_в$ і нижньої $f_н$ граничними частотами: $\mathbf{\Delta f = f_в - f_н}$.

Нижня гранична частота відеосигналу відповідає передачі нерухомого зображення, що має мінімальне число змін яскравості. Найпростішим є нерухоме зображення, що складається з двох деталей різної яскравості, які мають горизонтальну межу розділу. Таке зображення має одну зміну яскравості при передачі одного кадру зображення. При черезстрочній розгортці за нижню межу спектру $f_н$ слід прийняти частоту, що дорівнює числу полів, які передаються в секунду, тобто $f_н = 2 \cdot 25$ кадр/с =50 Гц.

Верхня частота спектру утворюється при передачі максимально складного зображення. З аналізу умов передачі найбільш складного з погляду детального ТВ зображення виходить, що верхня частота спектру $f_в$ визначається виразом:

$$f_{\text{в}} = \frac{kz^2 f_{\text{к}}}{2} = \frac{4 \times 625^2 \times 50}{3 \times 2} \approx 13\text{МГц} \ ,$$

де k – *формат кадру* телевізійного зображення, тобто відношення ширини (b) до його висоти (h): $k=b/h$, яке дорівнює k=**4:3 = 1,33**;

z – кількість рядків, яке дорівнює **625**;

$f_к$ – частота кадрової розгортки, яка дорівнює **50 Гц**.

При використанні черезрядкової розгортки частота кадрів зменшується в 2 рази (25 Гц), тому верхня частота зменшується до 6,5 МГц. На практиці можливе зниження верхньої границі спектру до 5…6 МГц без помітного погіршення якості зображення.

В мережах аналогового телемовлення *для передачі зображення* використовується *амплітудну модуляцію з частковим придушенням нижньої бічної смуги частот*, що приводить до зниження надмірності інформації в

АМ сигналах. Згідно ГОСТ 7845-92 номінальна смуга частот радіоканалу для передачі *зображення* складає ***7,625 МГц*** (рис.4.30).

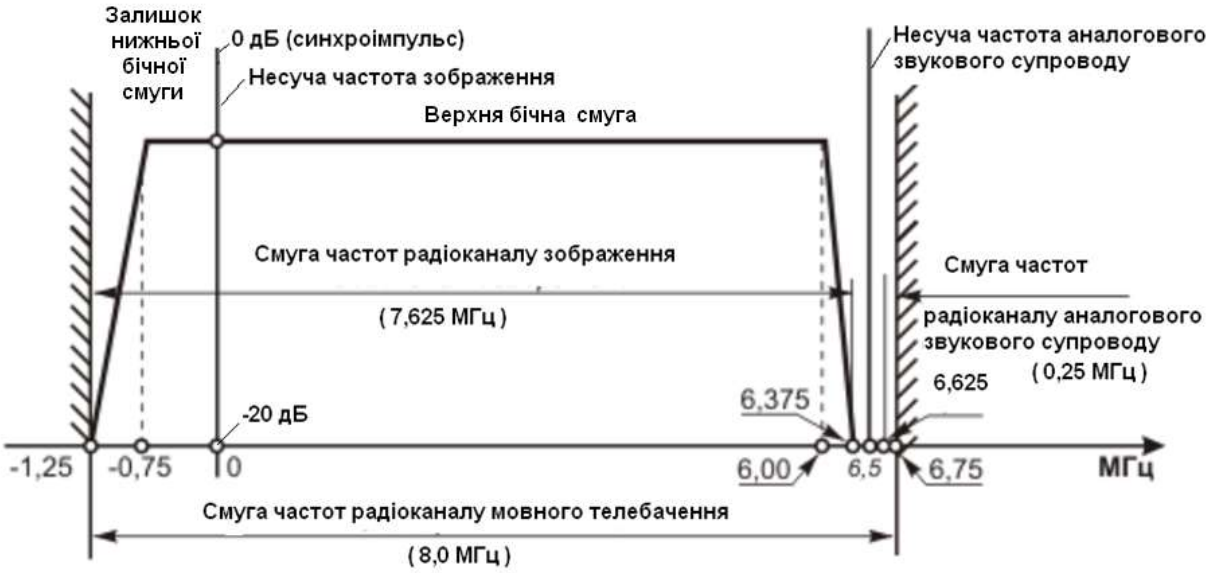


Рис.4.30 – Спектр аналогового телевізійного сигналу
з аналоговим звуковим супроводом

В кожному *стандартному радіоканалі* шириною **8 МГц** із сигналом зображення передається і радіосигнал звукового супроводу. При цьому використовується частотна модуляція, що забезпечує високу завадостійкість тракту звукового супроводження. Максимальна девіація частоти складає ±50 кГц при номінальній смузі частот не більше 0,25 МГц. Рознесення між несівними частотами зображення та звуку в радіосигналі складає **6,5 МГц**.

Телевізійні стандарти

Телевізійні стандарти регламентують:

- частотні діапазони метрових і дециметрових хвиль;
- розподіл каналів у цих діапазонах;
- частотні параметри АЧХ каналу по високій та проміжній частотам;
- параметри розкладання зображення, частоти кадрової й рядкової розгорнень;
- вид модуляції несівних зображення та звуку;
- значення граничних частот радіоканалу;
- ширину бічної подавленої смуги;
- чіткість зображення тощо.

На цей час затверджено 10 телевізійних стандартів:

- B, G, H - західноєвропейські;
- D, K, K1 - східноєвропейські;
- I - англійський;
- L - французький;
- M і N - американські.

Крім 10 стандартів чорно-білого телебачення існують ще 3 *стандарти кольорового аналогового телебачення* (*PAL, SECAM, NTSC)*. Найбільш застосовані наступні комбінації стандартів:

- в системі *SECAM - B, D, L, M*;
- в системі *PAL - G, H, K, K1*;
- в системі *NTSC - M*.

4.5. Системи кольорового телебачення

Особливості передачі інформації про колір

Фізіологічні основи кольорового зору базуються на теорії трикомпонентного зору, запропонованої вперше в 1756 році М.В. Ломоносовим, згідно з якою допускається присутність на сітківці ока трьох видів нервових апаратів, кожний з яких має переважну чутливість до певної ділянки видимого спектра:

- короткохвильової (синьої),
- середньохвильової (зеленої)
- довгохвильової (червоної).

Ця теорія добре узгоджується із законами змішання кольорів. З *основного закону змішання кольорів* випливає, що будь-який колір може бути виражений через три взаємонезалежні кольори:

$$fF = rR + gG + bB,$$

де fF – випромінювання довільного складу кольору, одиниця якого позначена через F, а кількість одиниць – через f;

R, G, B – одиничні кількості основних кольорів;

r, g, b – множники, які позначають кількість відповідних кольорів.

Існує багато різних моделей опису кольору, але всі вони належать до одного із трьох типів:

– психологічні – засновані на сприйнятті кольору людиною та пов’язані із особливостями її зорової системи;

– адитивні – засновані на додаванні випромінювань окремих зон спектра світла та пов’язані із джерелами світла;

– субтрактивні – засновані на вирахуванні окремих зон спектра світла при відбитті або пропущенні світла та пов’язані із пофарбованими (чорнилом, фарбами, пігментами й барвниками) поверхнями та середовищами.

На практиці вони одержали наступні позначення:

– CIE Lab – психологічний колірний простір;
– CMYK – субтрактивний колірний простір.
– RGB – адитивний колірний простір;

Технічну реалізацію знайшли моделі *CMYK* та *RGB.*

В *субтрактивній моделі кольору* ***CMYK*** *(Cyan*-блакитний, *Magenta* – пурпур, *Yellow* – жовтий, *Key color* – чорний) при змішуванні двох або більш основних фарб додаткові *кольори виходять за допомогою поглинання одних світлових хвиль спектра білого кольору й відбиття інших* (рис.4.31). Так, блакитна фарба поглинає червоний колір і відбиває зелений і синій, а жовта поглинає синій колір і відбиває червоний і зелений.

Дана модель використовується, насамперед, у поліграфії для стандартного *тріадного друку*. Колір в *CMYK* залежить не тільки від спектральних характеристик барвників та способу їх нанесення, але і їх кількості, характеристик паперу та інших факторів.

Власне, для одержання повної палітри достатньо три кольори: *блакитний, пурпурний, жовтий*. *Чорний* використовується для посилення чорного, через недостатньо якісну накатку поліграфічних машин.

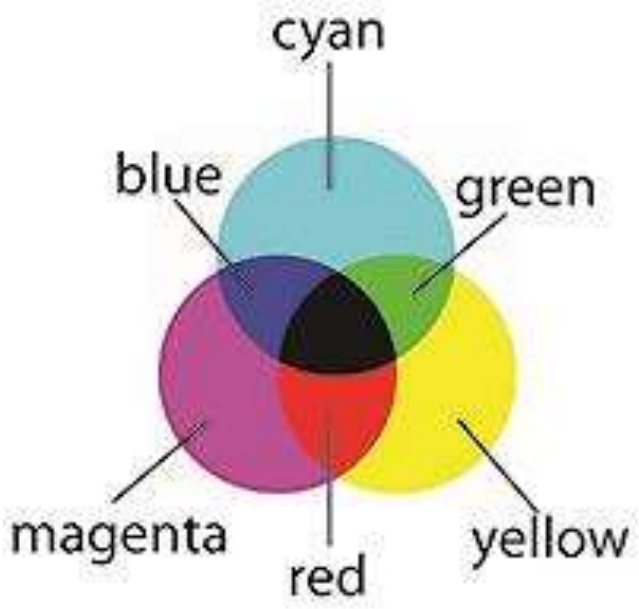


Рис. 4.31 – Схема субтрактивного синтезу в моделі *CMYK*

Адитивна модель кольору ***RGB*** застосовується для електронних пристроїв введення-виведення зображення (телевізори, монітори, цифрові

камери), в яких відтворення кольору засноване на випромінюванні або пропущенні світла, а не на його відбитті від поверхні при створенні зображення.

Адитивною вона називається тому, що кольори в ній генеруються підсумовуванням світлових потоків. Сума червоного, зеленого і синього кольорів максимальної однакової інтенсивності дає білий колір (рис. 4.32), при відсутності – чорний.

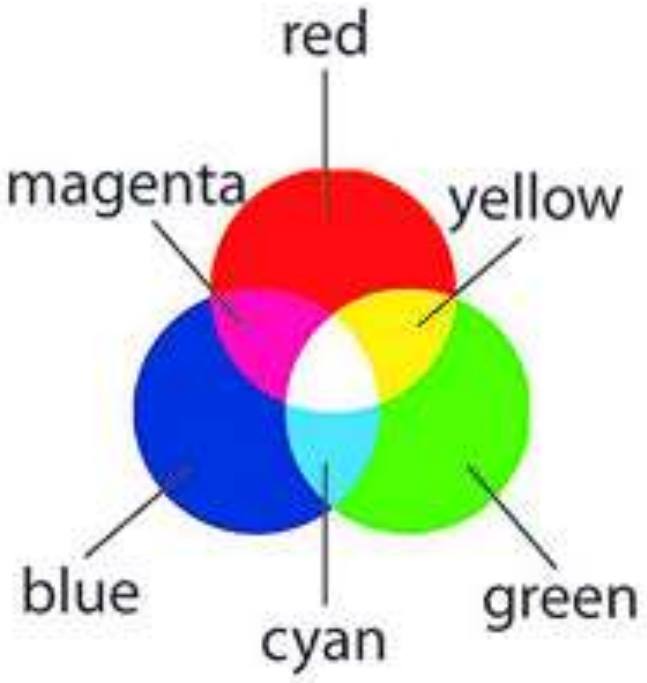


Рис.4.32 – Модель RGB
R – red (червоний), *G – green* (зелений), *B – blue* (блакитний).

Вибір основних кольорів обумовлений особливостями фізіології сприйняття кольору сітківкою людського ока. Колірна модель *RGB* знайшла широке застосування в техніці.

Отже:

– перевага RGB – з погляду редагування зображення на екрані комп'ютера, ця колірна модель є найбільш зручною, тому що забезпечує доступ до всіх 16 мільйонів кольорів, які можуть бути виведені на екран;

– недоліком RGB є те, що не всі кольори, створені в цій моделі, можуть бути виведені на друк (для друку використовується система CMYK, яка була розглянута вище).

Загальні висновки:

– в адитивній моделі (*RGB*) світлові потоки додаються, що призводить до формування більш яскравих кольорів, а в субтрактивній моделі (*CMYK*) світлові потоки віднімаються, генеруючи більш темні кольори;

– *CMYK* на папері на відміну від *RGB* при максимальній яскравості дає чорний колір, а при відсутності сигналу – білий, у цьому їхня принципова відмінність.

Кольороворізницеві сигнали

Передавальна камера перетворює світловий потік F_0 у в три світлові потоки, які на виході передавальної трубки (ПТ) формують для передачі по каналу сигнали трьох основних кольорів E_R, E_G, E_B (рис.4.33).

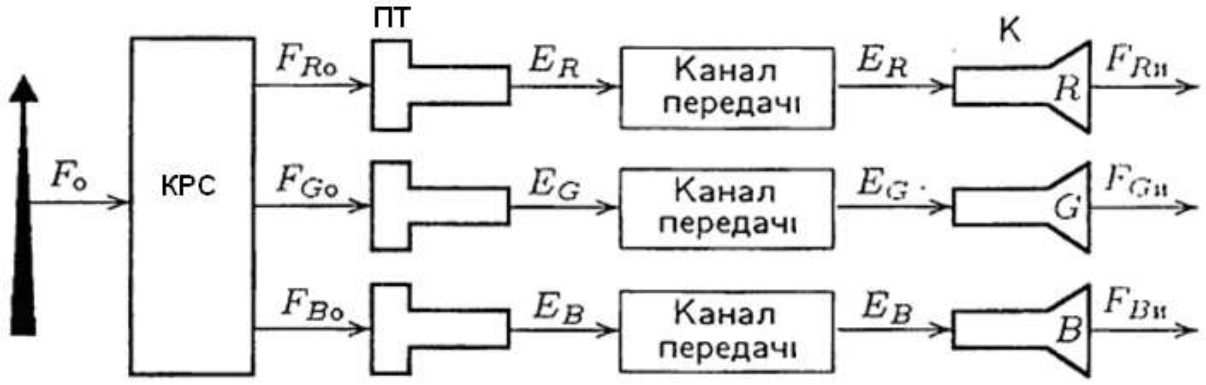


Рис.4.33 – Структурна схема телевізійного такту передачі кольорового зображення

Для забезпечення сумісності систем кольорового та чорно-білого (монохромного) телебачення в каналі передачі повинен бути присутнім ***сигнал яскравості*** $\boldsymbol{E_Y}$, який спеціально формується на передавальній стороні тракту і несе повну інформацію про яскравісні співвідношення чорного і білого кольорів переданих елементів зображення:

$$E_Y = aE_R + bE_G + cE_B.$$

При формуванні *білого кольору* звичайно вважається, що джерела основних кольорів забезпечують однакову максимальну інтенсивність основних сигналів: $\boldsymbol{E_R = E_G = E_B}$.

В різних стандартах кольорового телебачення коефіцієнти *a*, *b*, *c* приймають різні значення, наприклад, вони можуть бути рівними: *a*=0,299, *b*=0,587, *c*=0,114:

$$E_Y = 0{,}30E_R + 0{,}59E_G + 0{,}11E_B.$$

Для передачі кольорових зображень крім сигналу яскравості (***E_Y***) передають сигнали кольоровості. Для одержання сигналу про колір достатньо передати лише *два колірні сигнали*. Сигнал третього кольору може бути відновлений у приймачі із сигналу яскравості та сигналів двох інших основних кольорів. Такий спосіб має деяку надмірність, тому що в сигналі кожного із кольорів міститься також і інформація про яскравість. Тому в системах кольорового телебачення більш ефективним виявляється передача замість сигналів двох кольорів так званих ***кольороворізницевих сигналів***:

$$E_{R-Y} = E_R - E_Y,$$
$$E_{B-Y} = E_B - E_Y.$$

Тобто по каналу зв'язку достатньо передавати наступні сигнали: сигнал яскравості (E_Y) *та* двох кольороворізницевих сигналів (E_{B-Y} і E_{R-Y}), а в приймачі можуть бути отримані сигнали всіх основних кольорів:

$$E_R = E_Y + (E_R - E_Y),$$
$$E_B = E_Y + (E_B - E_Y),$$
$$E_G = [E_Y - (aE_R + cE_B)]:b.$$

До основних систем аналогового кольорового телебачення відносять: *NTSC, PAL* и *SECAM.*

Система ***NTSC*** була розроблена в США в 1950-1953 рр. національним комітетом телевізійних систем (*National Television System Committee*) і затверджена в країні як національний стандарт, а пізніше була прийнята в більшості країн Американського континенту, Японії, Кореї та інших.

В *NTSC*, узагальнена структурна схема якої представлена на рис. 4.34б, передається *сигнал яскравості* (E_Y) і два *кольороворізницевих* (E_I і E_Q).

Передача кольороворізницевих сигналів здійснюється в спектрі яскравісного сигналу на одній піднесівній частоті f_S= 3,579545 МГц (рис. 4.34а).

Для того, щоб здійснити модуляцію однієї піднесівної частоти двома кольороворізницевими сигналами використовують *метод квадратурної амплітудної модуляції*, сутність якого полягає в додаванні двох напруг піднесівної частоти U_{R-Y} і U_{B-Y}, кожна з яких промодульована

кольороворізницевим сигналом в окремих амплітудних модуляторах (АМ). Піднесівна частота на модулятори надходить у квадратурі, тобто з фазовим зсувом 90^0. Отриманий сигнал виходить промодульованим по амплітуді та по фазі.

Таким чином, *фаза результуючого вектору U_S (рис. 4.34а) несе інформацію про колір, а амплітуда U_S визначає його насиченість*.

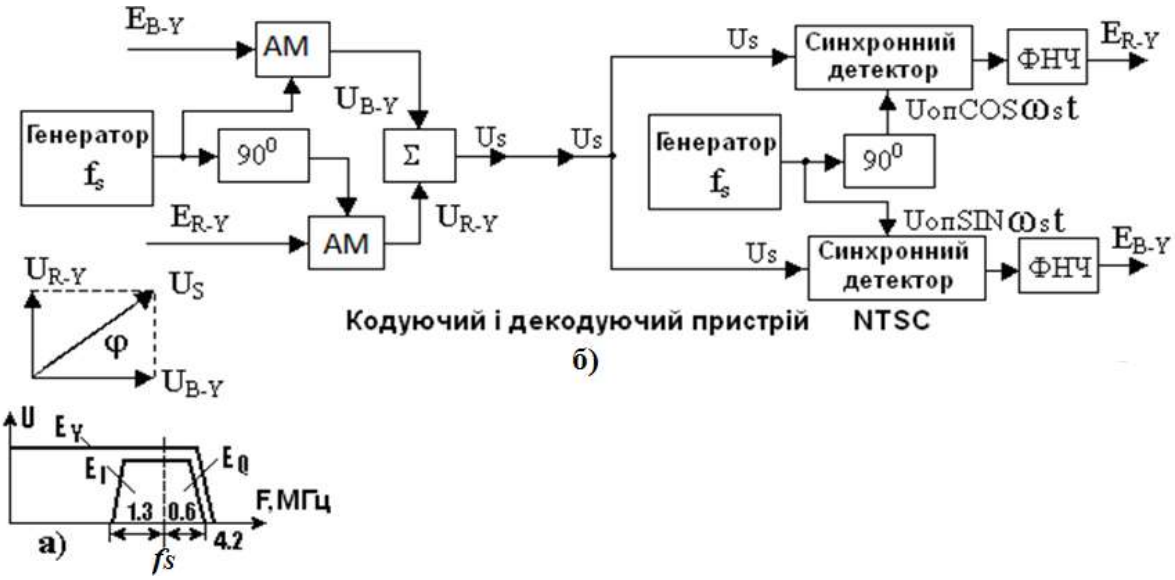


Рис.4.34 – Структурна схема системи *NTSC*

У системі *NTSC* використовуються *балансні модулятори*, які, придушують піднесівну і залишають тільки бічні смуги. Це дозволяє, як мінімум, в 2 рази зменшити розмах сигналу кольоровості, що зменшує його помітність на чорно-білому телевізорі, а на незабарвлених деталях він взагалі рівний 0. На прийомній стороні за допомогою синхронних детекторів відновлюються вихідні сигнали кольоровості.

Основні переваги систем *NTSC*:

– гарна сумісність за рахунок твердого зв’язку частот розгорнення із піднесівною та вдалого вибору піднесівної;

– ефективне використання каналу – при порівняно вузькосмугових сигналах кольоровості досягається досить висока якість зображення;

– висока завадостійкість каналу кольоровості завдяки застосуванню синхронного детектування.

Головний недолік систем *NTSC* – чутливість системи до диференціальних викривлень амплітуди й фази сигналу кольоровості (припустимим значенням зрушення є $10^0…12^0$) через можливу модуляцію його сигналом яскравості, що тягне зміну колірного тону й насиченості, різної на по-різному яскравих ділянках.

Розробка системи ***SECAM*** була почата у Франції в 50-і роки, потім в 60-роки доопрацьована разом із СРСР, а з 1967 р. – використовувалася для регулярного телемовлення. Система *SECAM* була поширена в країнах східної Європи, Близького й Середнього Сходу, Африки. Названа система виникла по французьких словах «*Seguentiel de Couleur Avec Memoire»* – почерговість кольорів і пам'ять.

Як і в *NTSC*, у системі *SECAM* (рис.4.35) передаються три сигнали: *яскравісний (E_Y) і два кольороворізницевих (E_{R-Y} і E_{B-Y}).*

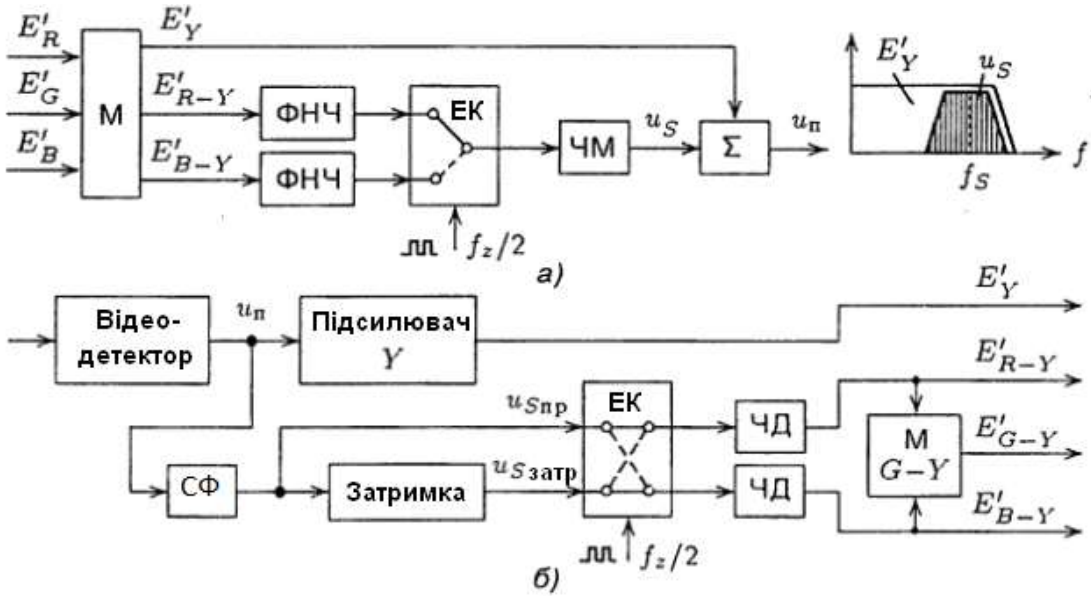


Рис.4.35 – Спрощена функціональна схема пристроїв *SECAM*:
а) – кодуючого, б) – декодуючого
(**М** – матриця, **ЕК** – електронний комутатор, **СФ** – смуговий фільтр,
f_Z - частота рядків)

Основні особливості *SECAM*:

– за рядок передається тільки один із кольороворізницевих сигналів, які попадають у канал передачі по черзі, що дозволяє уникнути перехресних завад, властивих NTSC;

– застосовується частотна модуляція піднесівної частоти кольороворізницевими сигналами.

Переваги системи *SECAM*:

– теоретично повністю виключені перехресні завади між сигналами кольоровості, хоча через недосконаліть роботи комутаторів вони все-таки можуть проходити;

– нечутливість до диференційно-фазових спотворень;

– менша чутливість до змін амплітуди сигналів кольоровості.

Недоліки *SECAM*:

– більша сприйнятливість до флуктуаційних завад, особливо при досить малих сигналах.

– гірша сумісність – у чорно-білих телевізорах через відсутність режекції піднесівної її структура досить помітна.

– сильніше проявляються перехресні спотворення яскравість-кольоровість.

– гірше колірна чіткість через послідовність передачі кольорів, що особливо позначається на горизонтальних границях насичених кольорів, що призводить до комбінації кольорів.

Система ***PAL*** була розроблена німецькою фірмою *Telefunken* і прийнята в 1966 р. в якості стандарту в більшості країн Західної Європи та світу. Була названа по англійській фразі «*Phase Alternation Line*» – чередування фази по рядках. Може розглядатися як вдала модернізація системи *NTSC*.

В *PAL* використовуються ті ж сигнали, що й в інших системах аналогового кольорового телебачення, і *квадратурна модуляція*, а відмінність полягає в тому, що фаза однієї із квадратурних складових сигналу кольоровості від рядка до рядка *змінюється на* 180^0, що усуває основний недолік системи NTSC – чутливість до диференційно-фазових спотворень, і дає ряд додаткових переваг. За допомогою лінії затримки на рядок здійснюється «запам'ятовування» сигналів кольоровості, а потім обидва сигнали складаються або віднімаються. Таким чином, у приймачі можна звичайним детектором розділити кольороворізницеві сигнали. Схема так званого "простого" приймача *PAL* (*Simple PAL*) практично не відрізняється від приймача *NTSC* крім додавання комутатора фази опорного генератора в пристрій синхронного детектора.

Основні переваги системи *PAL*:

– за рахунок застосування, як і в NTSC, квадратурної балансної модуляції система характеризується гарною сумісністю, ефективністю поділу сигналів яскравості й кольоровості, високою завадостійкістю до флуктуаційних шумів тощо;

– мала чутливість до диференційно-фазових спотворень сигналу кольоровості за рахунок застосування комутації фази однієї із квадратурних складових і блоку затримки в декодері;

– в приймачі більш ефективно придушуються складові яскравісного сигналу, які створюють перехресні завади у каналі кольоровості, відсутність мерехтіння границь на горизонтальних колірних переходах.

Недоліки *PAL* – більш складна схема приймача та гірша колірна чіткість по вертикалі.

Контрольні запитання

1. Де застосовуються моделі опису кольору зображення?
2. В чому полягає принцип передачі інформації про колір в моделях CMYK і RGB?
3. Яким чином в моделях *CMYK* і *RGB* отримують білий та чорний кольори?
4. Що таке кольороворізницеві сигнали і чому вони використовуються в кольоровому телебаченні?
5. Які застосовуються системи аналогового кольорового телебачення, в чому полягають їх особливості, переваги та недоліки?

4.6. Особливість цифрового представлення сигналів зображення та звуку

Системи, в яких для передачі, зберігання, обробки і приймання використовується аналоговий сигнал, *називаються аналоговими*. Ці системи мають ряд недоліків, які серйозно обмежують можливості розвитку телебачення. Одним з головних - є низька завадостійкість аналогового сигналу, який зазнає впливу шумів і завад у кожній ланці довгого ланцюга пристроїв перетворення та передачі сигналів. При аналоговій системі передачі завади кожної ланки накопичуються.

Суттєво зменшити спотворення від завад і розв’язати ряд інших завдань дозволяють цифрові методи, в яких вхід тракту цифрового телебачення надходить аналоговий сигнал, де він кодується, тобто перетворюється в цифрову форму. Це перетворення представляє комплекс операцій аналого-цифрового перетворення, основними з яких, як відомо, є: *дискретизація, квантування й безпосереднє кодування*.

Для ТВ сигналу з верхньою частотою спектра зображення 6 МГц необхідна *частота дискретизації* $f_{такт}$ = 12 МГц. В системах кольорового телебачення для уніфікації цифрового ТВ сигналу стандартів різних країн її встановлюють рівної **13,5 МГц.** Для забезпечення максимального числа градацій яскравості помітних оком, які коливаються від 100 до 200 необхідно використовувати 7 або 8 розрядний код, що забезпечує 128 або 256 півтонів. При цьому швидкість передачі цифрового потоку буде складати: $C = N \cdot f_{такт} = 8 \cdot 13{,}5 =$ **108 Мбіт/с** (де N – розрядність коду).

Таку високу швидкодію повинні мати як пристрої обробки ТВ сигналу, так і канали зв’язку для його передачі, що технічно важко реалізувати!

Для скорочення необхідної швидкості передачі використовують *спеціальні методи стиску* ТВ сигналів, за рахунок усунення інформаційної надмірності, яку розділяють умовно на *статистичну та фізіологічну*.

Узагальнену структурну схему системи цифрового телебачення можна представити в такий спосіб (рис. 4.36).

Рис. 4.36 – Узагальнена структурна схема цифрової ТВ системи

На початку розробки основною перешкодою для просування цифрового телебачення була різна ширина смуги спектра, необхідного для передачі цифрового ТВ сигналу. МСЕ встановив три номінальні смуги частот радіоканалів передачі сигналів ТВ мовлення:

- 6,0 МГц – системи *M, N* (*NTSC, PAL*);
- 7,0 МГц – система *B* (*SECAM, PAL*);
- 8,0 МГц – системи *G, H, I, D, K, K1, L* (*SECAM, PAL*).

У зв'язку із цим була запропонована *концепція 6-7-8*, що гарантувала можливість передачі цифрових сигналів по стандартних радіоканалах наземного ТВ мовлення зі смугами 6, 7 і 8 МГц. ЇЇ реалізація дала можливість суттєво підвищити ефективність використання пропускної здатності існуючих і знов створюваних супутникових, наземних і кабельних систем телебачення. Зараз залежно від ступеня стиску з різними градаціями якості вдається передавати від 4 до 10 різних ТВ програм в одному стандартному радіоканалі телебачення.

Цифрове представлення відеосигналу

Компонентний телевізійний відеосигнал може бути представлений у цифровій формі відповідно до ***Рекомендації ITU-R 601***. Ця рекомендація встановлює правила роздільної дискретизації, квантування і кодування сигналу яскравості *Y* і двох кольороворізницевих сигналів *R-Y(Cr)* і *B-Y(Cb*). Частота дискретизації для яскравісного сигналу *Y* встановлена ***13,5 МГц***, для кольороворізницевих сигналів – ***6,75 МГц***, тобто частота

дискретизації яскравісного сигналу в 2 рази більше частоти дискретизації кольороворізницевих сигналів. Якщо вибрати, як прийнято, в якості умовної (базової для ієрархії цифрових стандартів) одиниці частоту ***3,375 МГц***, то частоти дискретизації яскравісного і двох кольороворізницевих сигналів будуть перебувати у наступному співвідношенні **4:2:2**. При таких значеннях частот дискретизації можна практично без спотворень перетворити у цифрову форму сигнал яскравості в смузі до 5,75 МГц, а кольороворізницеві сигнали – у смузі до 2,75 МГц.

Повна швидкість передачі цифрового компонентного відеосигналу становить при кодуванні за схемою 4:2:2 буде складати:

$$10 \cdot 13{,}5 + 10 \cdot 6{,}75 + 10 \cdot 6{,}75 = 270 \text{ Мбит/с}.$$

Існують і інші схеми співвідношення частот (рис.4.37).

Рис. 4.37 – Формати представлення компонентного сигналу в цифровій формі

Цифрове представлення звукового супроводу

Людина сприймає звук у діапазоні від 15 Гц до 22 кГц, з віком рамки звужуються, і середня доросла людина чує звуки від *20 Гц до 18 кГц*. Динамічний діапазон людського вуха становить приблизно *96 дБ* – найгучніший звук (вище якого знаходиться болючий поріг) більш ніж в 30 тисяч раз інтенсивніше самого тихого, який вухо може розрізнити.

У більшості сучасних цифрових звукових систем використовуються стандартні частоти дискретизації 44,1 або 48 кГц, однак частотний діапазон звукового сигналу звичайно обмежується біля 20 кГц для залишення запасу стосовно теоретичної межі. Також найпоширеніше 16-розрядне квантування за рівнем, що дає граничне співвідношення сигнал/шум близько 98 дБ. У студійній апаратурі використовуються більш високу роздільну здатність: 18-, 20- і 24-розрядне квантування при частотах дискретизації 56, 96 і 192 кГц. Це робиться для того, щоб зберегти вищі гармоніки звукового сигналу, які безпосередньо не сприймаються слухом, але впливають на формування загальної звукової картини.

Для «оцифрування» більш вузькосмугових і менш якісних сигналів частота та розрядність дискретизації можуть знижуватися; наприклад, у телефонних лініях застосовується 7- або 8-розрядне кодування із частотами дискретизації 8…12 кГц.

Для передачі звукового супроводу в телебаченні застосовуються цифрові сигнали *стандарту AES/EBU*, який передбачає для аналого-цифрового перетворення звуку використання імпульсно-кодової модуляції із лінійною шкалою квантування, причому на один відлік для звукових даних виділяється до 24 біт. Форма представлення кодових слів – послідовна.

Стандарт *AES/EBU* допускає ряд частот дискретизації, з яких найбільш зручною для телебачення є частота 48 кГц, при якій тривалість блоку становить 4 мс. При цьому встановлюється просте співвідношення між частотою дискретизації звуку й частотою відеокадрів, що спрощує синхронізацію та передачу цифрових сигналів відео і звуку по одній лінії зв'язку. Швидкість передачі звукових даних при частоті 48 кГц становить 3,072 Мбіт/с.

Таким чином, передача зображення та звукового супроводу в цифровій формі потребує швидкості цифрового потоку даних не менше 273 Мбіт/с.

Класифікація методів стиснення

Для цифрового телебачення встановлено, що розмір переданого ТВ зображення без компресії на протязі однієї секунди становить 165 Мбіт, за хвилину – 9900 Мбіт (9,9 Гбіт), за годину – 594 Гбіт. Для 24-х годинного запису буде потрібно 14,3 Тбіт, що відповідає приблизно двадцяти двом жорстким дискам ємністю 80 Гбіт. Для більш раціонального використання дискового простору та передачі по каналах зв'язку цифрове відео завжди підлягає стиску.

Компресія статичного або відеозображення може бути здійснена двома основними методами:

- із втратою якості;
- без втрати якості.

При *стиску без втрат* даних отримане після декомпресії зображення буде із точністю (побітно) збігатися з оригіналом. Прикладом такого стиску може служити формат ***GIF*** для статичної графіки та ***GIF89a*** для відео. Оскільки коефіцієнт стиску при використанні таких видів компресії невеликий, їх достатнє важко використовувати, тому що в мережних відео рішеннях передаються великі обсяги відеоінформації.

При *стиску із втратами якості* незважаючи на те, що два зображення – оригінал і результат стиску з використанням того або іншого компресора –

побітно можуть не збігатися, різниця між ними буде зовсім непомітною. Основна ідея при цьому – значно збільшити коефіцієнт стиску, зневажаючи незначними деталями, не помітними для людського ока. Прикладами цього є алгоритми ***JPEG*** для стиску статичної графіки та алгоритм ***M-JPEG*** для стиску відео.

Одним із можливих і найпоширеніших способів обробки, стиску зображень і відеопослідовностей є застосування *ортогональних перетворень*, в основі яких можуть бути покладені різні принципи. Найбільш часто використовуються методи *лінійних ортогональних перетворень*.

Порівняльний аналіз відомих методів стиску показав, що для обробки зображень доцільно спочатку виконати перетворення зображення, а потім здійснити стиск перетворених даних без втрат інформації. Найбільш оптимальними для цієї мети виявилися наступні перетворення:

- перетворення Уолша-Адамара (WHT);
- перетворення Карунена-Лоєва (KLT);
- дискретне косинус не перетворення (DCT).

DCT є добре вивченим і досить ефективним перетворенням, було запропоновано В.Ченом в 1981 році та використовується у форматах *JPEG, MJPEG, MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4*. *Перевагою DCT* є швидка збіжність ряду, що забезпечує меншу погрішність помилки перетворення.

Всі методи стиску інформації засновані на припущенні, що набір даних завжди містить надлишкові елементи. Стиск досягається за рахунок пошуку та кодування надлишкових елементів. Потік даних про зображення має істотну кількість зайвої інформації, яка може бути усунута практично без помітних для ока викривлень.

При цьому розрізняють два типи надмірності: статистичну та фізіологічну.

Статистична надмірність пов’язана із кореляцією та передбачуваністю даних. Ця надмірність може бути усунута без втрати інформації, вхідні дані при цьому можуть бути повністю відновлені. Цими властивостями володіє відомий *алгоритм Хаффмана*.

Фізіологічна (суб’єктивна) *надмірність* обумовлена обмеженістю можливостей зорового апарата людини, тобто можна не передавати в сигналі інформацію, яка не буде сприйнята нашим зором. Таку надлишкову інформацію можна усунути із частковою втратою даних відтворених зображень, що мало впливають на якість.

Будь-який метод стиску передбачає *три основні етапи*:

- кодування або первинний стиск;

– вторинний стиск;

– декодування або відновлення зображення.

На першому етапі виконується перетворення вхідних даних з однієї форми представлення в іншу. *На другому етапі* компоненти перетворення квантуються і приводяться до виду, зручного для статистичного кодування, а потім кодуються. На цьому етапі забезпечується ущільнення інформаційного потоку.

Основні параметри, що характеризують метод стиску:

1. *Коефіцієнт стиску (Кст*) – визначає в скільки разів файл, що зберігає стисле зображення, менше файлу, що зберігає вхідне зображення (величини V_1 і V_2 мають розмірність в байтах):

$$K_{ст} = V_1 : V_2.$$

2. *Оцінка якості декодованого зображення* – визначає середнє квадратичне та максимальне відхилення значень пікселів стислого зображення від оригіналу.

3. *Час перетворення* – розрізняють час стиску ($t_{ст}$) і час відновлення ($t_{відн}$).

В світі сформувалися дві різні платформи цифрових технологій для теле- та радіомовлення:

- *DAB* (*Digital Audio Broadcasting*), *DRM* (*Digital Radio Mondiale*), *DVB* (*Digital Video Broadcasting*);
- *ATSC* (*Dolby AC -3*).

Перша з них підтримується в Європі, друга – в США.

При цьому в них широке застосування знаходять:

– алгоритми компресії цифрових відео- і аудіоданих, які реалізовані в стандартах групи *MPEG (Moving Pictures Expert Group)* і *ATSC (Advanced Television System Committee)*:

– *MPEG-1 – ISO/IEC 11172-3*;

– *MPEG-2 – ISO/IEC 13818-3 і 13818-7 AAC*;

– *MPEG-4 – ISO/IEC 14496-3*;

– *Dolby Digital (AC-3) (стандарт ATSC з кодом A/52)*;

– високоефективні методи модуляції:

– *DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying)*;

– *QAM (Quadrature Amplitude Modulation)*;

– *VSB-8T (Vestigial Side Band)*;

– *OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)*;

– *COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex).*

Стандарти *MPEG*

Основи розробки стандарту ***MPEG*** були закладені групою вчених з *MPEG (Motion Picture Experts Group*) ще в 80-х роках минулого століття.

Основний принцип MPEG стиску – це порівняння двох послідовних образів і передача в мережу тільки невеликої кількості кадрів (так званих *I-frame* або ключових кадрів), що містять повну інформацію про зображення. Інші кадри (проміжні кадри – *P-frame*) містять тільки відмінності цього кадру від попереднього.

Іноді застосовують двонаправлені кадри (*B-frame*), інформація в яких кодується на підставі попереднього і наступного кадрів, що дозволяє додатково підвищити ступінь стиску відео. У всіх форматах *MPEG* використовується *метод компенсації руху*.

Алгоритм стиснення *MPEG* можна розділити на три етапи:

- попередня обробка;
- основне перетворення;
- кодування і упаковка компонентів перетворення.

Це досить схематичне пояснення, алгоритми *MPEG* набагато складніші. При кодуванні враховується текстура зображення, використовуються *методи пророкування руху, квантизація й статистичне кодування.*

Основні ідеї, які застосовують в алгоритмах *MPEG*, наступні:

- усунення часової надмірності відео, яке враховує той факт, що в межах коротких інтервалів часу більшість фрагментів сцени виявляються нерухомими або незначно зміщуються по полю;
- усунення просторової надмірності зображень шляхом придушення дрібних деталей сцени, несуттєвих для візуального сприйняття людиною;
- використання більш низького кольорової роздільної здатності при yuv-представленні зображень (y – яскравість, u і v – кольороворізницеві сигнали) на підставі того, що око людини менш чутливе до просторових змін відтінків кольору в порівнянні зі змінами яскравості;
- підвищення інформаційної щільності результуючого цифрового потоку шляхом вибору оптимального математичного коду для його опису (наприклад, використання більш коротких кодових слів для найбільш часто повторюваних значень).

На даний момент існує три стандарти *MPEG* для передачі відеоінформації:

MPEG-1 був стандартизований і почав використовуватися в 1993 р. Він був призначений для стиску та зберігання відео на компакт-дисках. Більшість пристроїв кодування *MPEG-1* і декодерів були розроблені для швидкості передачі даних порядку 1,5 Мбіт/с при роздільній здатності *CIF*. *Основний упор при його розробці робився на збереженні постійної швидкості передачі, при змінній якості відеозображення, порівнянної із якістю VHS*. При кодуванні використовується дискретне косинусне перетворення (ДКП) – виконується апроксимація всередині блоку 8×8 пікселів хвильовими функціями. Швидкість передачі відеозображення в *MPEG-1* обмежено 25 кадрами в секунду в стандарті *PAL* і 30 – в *NTSC*. В даний момент цей стандарт практично не використовується.

MPEG-2 був прийнятий в якості стандарту в 1994 р. для застосування у високоякісному цифровому відео (*DVD*), цифровому телебаченні високої якості (*HDTV*), інтерактивних носіях інформації (*ISM*), цифровому радіомовному відео (*DBV*) і кабельному телебаченні (*CATV*). Так само, як і в *MPEG-1* при кодуванні використовується ДКП, але блоки обробки збільшені в 4 рази – 16×16 пікселів. Швидкість передачі відеозображення обмежено 25 кадрами в секунду в стандарті *PAL* і 30 – в *NTSC*, так само, як в *MPEG-1*.

MPEG-4 (*H.264/AVC)* – це подальший розвиток стандарту *MPEG2*. Метою його створення було передача якісних зображень стандартної роздільної якості *SDTV* при невеликій швидкості цифрового потоку 1,5…2 Мбіт/с і телебачення високої чіткості *HDTV* при швидкості цифрового потоку 6…10 Мбіт/с.

Всі версії стандарту *MPEG-4* базуються на використанні кодека, що *реалізує внутрішньокадрове і міжкадрове кодування, компенсацію руху, дискретне косинусне перетворення, квантування і статистичне кодування*.

Його звукова частина містить технологію кодування аудіо (*AAC*), підтримує багатоканальний звук і звукове оточення. Забезпечення більш високої ефективності стиску потребує збільшення складності обладнання кодування на передавальній стороні і декодування – на приймальній. Обладнання кодування *AVC* приблизно у вісім разів складніше, чим обладнання *MPEG-2*, вимагає надзвичайно швидкої та інтенсивної потужності процесора обробки обчислень. Такі потужності обробки зараз доступні, що зробило використання *AVC* в *HDTV* комерційно життєздатним.

Переваги стандарту MPEG-4/AVC:

– більш ніж на 50% вища ефективність кодування в порівнянні з MPEG-2, що вимагає меншу пропускну здатність каналів;

– більше надання послуг в тій же самій смузі каналу;

– можливість надавати нові конкурентоспроможні послуги, такі як відео на замовлення тощо;

– вимагає меншого обсягу дискової пам'яті, серверів для зберігання відео-контенту, що знижує витрати на його зберігання тощо.

4.7. Стандарти цифрового телевізійного мовлення *DVB*

Перехід від аналогового до цифрового мовлення відбувається у всіх середовищах доставки телевізійної інформації: наземної, кабельної, супутникової. В країнах Району 1, куди входить Європа, Африка і країни Близького Сходу за основу прийняте сімейство європейських стандартів ***DVB*** (*Digital Video Broadcasting* – цифрове телевізійне мовлення):

– ***DVB-T/T2*** (*DVB-Terrestrial* – *наземне*) використовується для *ефірного наземного* цифрового телевізійного мовлення на стаціонарні, портативні або мобільні приймачі;

– ***DVB-C*** (*DVB-Cable* – кабельне) використовується для *кабельного* цифрового телевізійного мовлення.

– **DVB-S*/S2*** (*DVB-Satellite* – супутникове) використовується для *супутникового* цифрового телевізійного мовлення.

– ***DVB-H*** (*DVB-Handheld* – портативне) використовується для ефірного наземного цифрового телевізійного мовлення на *портативні переносні* пристрої;

– ***DVB-SH*** (*DVB-Satellite services to Handhelds – супутникові послуги на портативні приймачі)* – використовується для гібридного ефірного наземного й супутникового цифрового телевізійного мовлення на портативні переносні пристрої.

Відмінність стандартів серії *DVB* існує, насамперед, на фізичному рівні, що пояснюється адаптацією технічних характеристик до властивостей каналу передачі. Так у стандартах *DVB-T* і *DVB-H* використовується метод *OFDM*, що пояснюється його підвищеною стійкістю до частотно-селективних завмирань у порівнянні з радіотехнологіями, що випромінюють сигнали на одній несівній частоті.

Стандарти цифрового телебачення *DVB* діляться на групи по сфері застосування. Кожна група має скорочену назву із префіксом "*DVB –*",

наприклад, *DVB-DATA* – група стандартів, яка призначена для передачі даних по мережах цифрового ефірного (наземного), супутникового і кабельного телебачення *DVB.*

Основні характеристики стандарту DVB-T2

DVB-T2 (англ. *Digital Video Broadcasting - Second Generation Terrestrial*) – друге покоління європейського стандарту ефірного наземного цифрового телебачення *DVB-T*. *DVB-T2* дозволяє збільшити на 30 – 50% ємність мереж ефірного наземного цифрового телебачення в порівнянні з *DVB-T* при тій же інфраструктурі мережі і частотних ресурсах. *DVB-T2* технологічно несумісний з *DVB-T*.

В *DVB-T2* використовується стандарт стиску відео *MPEG-4/AVC* з модуляцією *OFDM*. Швидкість цифрового потоку – до 50 Мбіт/с. *DVB-T2* є останнім у сімействі стандартів *DVB* ефірного наземного цифрового телебачення. Подібно *DVB-T, DVB-T2* передбачає велику кількість різних режимів, це робить *DVB-T2* дуже гнучким стандартом. Для виконання корекції помилок в *DVB-T2* застосовується комбінація кодування з низькою щільністю перевірок на парність (*LDPC*) і кодування Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема (*BCH),* що забезпечує дуже стійкий сигнал і чудову якість в умовах із високим рівнем шумів і завад.

Існує кілька опцій таких параметрів, як число несівних, тривалість захисного інтервалу і розміщення пілот-сигналів. Це дозволяє знизити до мінімуму частку службової інформації для будь-якого заданого каналу передачі.

Ключові особливості характеристик *DVB-T2*:

– збільшена не менш ніж на 30% пропускна здатність і покращені характеристики одночастотних мереж (*SFN*) у порівнянні з *DVB-T*;

– можливість передача програм на мобільні і стаціонарні приймачі;

– широке використання інфраструктури *DVB-T*;

– зниження експлуатаційних витрат на стороні передачі за рахунок зменшення відносини пікової потужності до середньої потужності.

Рис.4.38 – Узагальнена схема обробки тракту передачі в системі *DVB-T2*

Покращення, які передбачені в *DVB-T2* у порівнянні з *DVB-T*:

– модуляція *OFDM* з додатковими режимами *IFFT*;
– кодування *LDPC* забезпечує ефективний захист від помилок;
– використання та інтеграція базової структури кадру з *DVB-S*2;
– поворот сигнального сузір'я з *Q*-затримкою;
– просторова передача *MISO*;
– зменшення пік-фактору.

Основні характеристики *DVB-T2*:

– модуляція *COFDM* сумісно з *QPSK*, 16-*QAM*, 64-*QAM* або 256-*QAM*;
– *OFDM* режими: 1k, 2k, 4k, 8k, 16k і 32k;
– відносні довжини захисних інтервалів: 1/128, 1/32, 1/16, 19/256, 1/8, 19/128 і 1/4;
– пряма корекція помилок (*FEC*) з каскадним застосуванням коригувальних кодів *LDPC* і БЧХ;
– *DVB-T*2 підтримує наступні смуги частотних каналів: 1,7 (призначена для мобільного телебачення); 5; 6; 7; 8 і 10 МГц;
– передача в режимі *MISO* (англ. *Multiple Input, Single Output*) з використанням схеми Аламоуті, тобто приймач обробляє сигнал від двох передавальних антен.

DVB-T2 дозволяє надавати різні цифрові сервіси і послуги:

– багатоканальне мультиплексування;
– телебачення стандартної чіткості *SDTV* у форматах співвідношення сторін екрана 4:3 і 16:9;
– телебачення високої чіткості *HDTV*;
– 3D-телебачення в стандарті *DVB 3D-TV*;
– інтерактивне гібридне телебачення в стандарті *Hbb TV*;
– відео по запиту;
– телегід;
– телетекст;
– субтитри;
– стереозвук;
– об'ємний звук;
– звук *Dolby Digital*;
– мультизвук (вибір мови мовлення);
– цифрове радіо;
– точний час і дату;

– передача даних у стандарті *DVB-DATA*;

– прямий і зворотний канал зв'язку для інтерактивних сервісів у стандартах *DVB-RCS* і *DVB-RCT*;

– широкосмуговий доступ в Інтернет.

Таблиця 4.3 – Порівняльна таблиця основних характеристик стандартів *DVB-T/T2*

Параметри	***DVB-T***	***DVB-T2***
Корекція помилок *(FEC)*	Згортаючий код + Код Рида – Соломона 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	*LDPC (Low Density Parity Check)* + *BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem)* 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6
Режими модуляції	*QPSK*, 16-*QAM*, 64-*QAM*	*QPSK*, 16-*QAM*, 64-*QAM*, 256-*QAM*
Захисний інтервал	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 19/256, 1/8, 19/128, 1/16, 1/32, 1/128
Розмірність дискретного перетворення Фур'є (ДПФ)	2*k*, 8*k*	1*k*, 2*k*, 4*k*, 8*k*, 16*k*, 32*k*
Смуга пропускання	6; 7; 8 МГц	1,7; 5; 6; 7; 8; 10 МГц
Макс. швидкість передачі даних (при відношенні С/Ш 20 дБ)	31,7 Мбіт/с	45,5 Мбіт/с
Необхідне відношення С/Ш (для 24 Мбіт/с)	16,7 дБ	10,8 дБ

З 2011 року в Україні почала своє мовлення цифрова мережа ефірного телебачення стандарту *DVB-T2* (компанія «Зеонбуд»). Було вирішено створювати мережу з 32 каналів (у тому числі: 28 – передбачено для загальнонаціонального мовлення, а 4 – для регіонального й місцевого), з яких 22 транслюють сигнали з роздільною здатністю *SDTV*, інші 10 каналів мають можливість роздільної здатності *HD*.

4.8. Мережі розподілу сигналів телевізійного мовлення

Сигнали телевізійних програм передаються абонентам (телеглядачам) за допомогою:

– наземної телевізійної передавальної мережі (наземне ефірне телебачення);

– систем кабельного телебачення (СКТБ);

– системи безпосереднього телевізійного мовлення, що використовує телекомунікаційні штучні супутники Землі, що знаходяться на геостаціонарній орбіті (супутникове телебачення);

– мережі Інтернет тощо.

Системи ефірного телебачення

Наземна телевізійна передавальна мережа складається з:

– телецентрів, що працюють спільно з радіотелевізійними передавальними станціями (РТПС);

– телевізійних ретрансляторів;

– технічних засобів передачі ТВ сигналів на великі відстані.

Телецентри являють собою комплекси радіотехнічної апаратури, приміщень і служб, необхідних для створення телевізійних програм. З телецентрів сформовані телевізійні сигнали безпосередньо передаються на РТПС.

Основним призначенням *телевізійних ретрансляторів* є забезпечення більш рівномірного покриття на густонаселеній території телевізійним мовленням. Телевізійні ретранслятори потрібні, зазвичай, у двох випадках: по-перше, поза зони впевненого прийому основної потужності РТПС і, по-друге, всередині зони в місцях, в яких з географічних причин сигнал основної станції ослаблений і не забезпечує задовільної якості прийому.

Розподіл сигналів телевізійних програм на великі відстані здійснюється за допомогою розгалуженої мережі радіорелейних ліній (РРЛ) та супутникових систем зв'язку.

Для організації наземного телевізійного мовлення з виділені п'ять частотних діапазонів:

– I діапазон – 48,5...66 МГц (радіоканали 1 і 2);
– II діапазон – 76...100 МГц (радіоканали 3...5);
– III діапазон – 174...230 МГц (радіоканали 6...12);
– IV діапазон – 470...582 МГц (радіоканали 21...34);
– V діапазон – 582...862 МГц (радіоканали 35...69).

Діапазони I-III(48,5-230 МГц) відносяться до діапазону метрових хвиль (*VHF*), діапазони IV-V(470-862 МГц) – до діапазону дециметрових хвиль (*UHF*).

Системи кабельного телебачення

Джерелами телевізійних сигналів в системах кабельного телебачення є *головні станції*. Телевізійний сигнал в системах кабельного телебачення передається в закритому середовищу поширення – по оптичним або коаксіальним кабелям. Системи кабельного телебачення отримали широке

застосування в крупних і середніх населених пунктах. Вони є засобом колективного розподілу телевізійного сигналу.

Перевагами систем прийому кабельного телебачення можна назвати високу якість телевізійного сигналу і підвищену завадостійкість, особливо в цифрових системах. На основі кабельних мереж можна створити систему інтерактивного телебачення. Для прийому цифрових програм кабельного телебачення необхідно використовувати цифрові кабельні ресивери.

Системи супутникового телебачення

Супутникове телевізійне мовлення – це передача через космічний супутник-ретранслятор телевізійного зображення і звукового супроводу від наземних передавальних станцій до користувацьких приймачів. В поєднанні з кабельними мережами, супутникова телевізійна ретрансляція сьогодні є основним засобом забезпечення багатопрограмного високоякісного телевізійного мовлення.

Значні переваги надає використання космічного апарату (КА), розташованого на так званій *геостаціонарній орбіті*, що знаходиться в площині екватора і має нульовий нахил кругової орбіти з радіусом 35735 км. Такий супутник робить один оберт навколо Землі точно за одну земну добу. Якщо напрямок його руху збігається з напрямом обертання Землі, то з поверхні Землі він здається нерухомим. Антени станцій, що працюють з геостаціонарним супутником, не вимагають складних систем наведення і супроводу, а в разі необхідності можуть бути встановлені пристрої для компенсації невеликих зміщень орбіти. Завдяки цій обставині в даний час майже всі супутники зв'язку, призначені для комерційного використання, знаходяться на геостаціонарній орбіті. Приблизно в однаковій позиції на одній географічній довготі можуть перебувати декілька КА, розташованих на відстані близько 100 км один від одного.

Супутникова лінія зв'язку з ретранслятором на геостаціонарній орбіті має ряд серйозних <u>переваг:</u>

- відсутність пристрою супроводу КА в антенній системі наземного комплексу;
- висока стабільність рівня сигналу в радіоканалі;
- відсутність ефекту Доплера;
- простота організації зв'язку в глобальному масштабі тощо.

<u>Недоліками</u> таких систем є перенасиченість геостаціонарної орбіти на багатьох ділянках, неможливість обслуговування областей які наближені до

полюсів, наявність прямої видимості антени КА і приймальної антени користувача.

Система супутникового телевізійного мовлення включає в себе наступні підсистеми:

- передавальний телевізійний центр;
- активний супутник-ретранслятор;
- приймальне абонентське обладнання.

Для систем супутникового мовлення виділені смуги частот, що представлені в табл. 4.4. Два останніх діапазони ($К_а$ та К) майже не використовуються і поки вважаються експериментальними. Однак мовлення супутникових телепрограм в цих діапазонах дозволить значно зменшити діаметр приймальних антен. Наприклад, якщо антени $К_u$-діапазону (10,70…12,75 ГГц) мають характерні розміри 0,6…1,5 м, то антени К-діапазону (84…86 ГГц) при тому ж значенні коефіцієнту підсилення – 0,10…0,15 м. Крім того, інформаційна ємність цих діапазонів значно вище (під інформаційною ємністю розуміється кількість телевізійних каналів, які можна розмістити в даному діапазоні частот).

Таблиця 4.4 – Діапазони супутникового телебачення

Назва діапазону	**Смуга частот, ГГц**
L-діапазон	1,452…1,550 та 1,61…1,71
S-діапазон	1,93…2,70
C-діапазон	3,40…5,25 та 5,725…7,075
X-діапазон	7,25…8,40
K_u-діапазон	10,70…12,75 та 12,75…14,80
K_a-діапазон	15,4…26,5 та 27,0…50,2
K-діапазон	84…86

Інтернет - телебачення

IP-телебачення включає в себе цифрову технологію пакетної передачі відеоданих в мережах за протоколом *IP*. Простіше кажучи, це телебачення через Інтернет. Обмін інформацією через Інтернет може бути двостороннім, що дозволяє не тільки отримувати відеодані, але і користуватися послугами інтерактивного телебачення, які надає оператор *IPTV*. Перелік послуг може бути дуже великим, їх кількість нічим не обмежена, а можливості визначаються наявністю відповідного обладнання та програмного забезпечення.

В якості джерела телевізійних фільмів і будь-яких відеоматеріалів можна розглядати *сервер IPTV*, у найпростішому варіанті він представляє звичайний комп'ютер із серверною операційною системою і жорсткими дисками великої ємності, які використовуються для зберігання відеоінформації. Сервер з'єднується з мережею Інтернет або з внутрішньою локальною мережею. До цієї ж мережі підключаються абоненти *IP*-телебачення. Для доставки відеоінформації від сервера до абонентів використовується пакетно-адресна передача інформації на базі *IP*-адресації мережі.

Розрізняють наступні типи трафіку: *Unicast, Broadcast та Multicast*.

Трафік Unicast – одноадресна передача пакетів. Кількість абонентів, що обслуговуються трафіком *Unicast*, обмежується смугою пропускання головної магістралі мережі. Для мережі *Gigabit Eternet* із смугою пропускання для ТВ-каналів стандартної чіткості 4 Мбіт/с кількість абонентів не повинна перевищувати 125. Застосування нових технологій стиснення зображення за допомогою формату *MPEG-4 AVC* дозволяє скоротити смугу ТВ-каналу до 1,2 Мбіт/с, що дає можливість збільшення кількості абонентів до 400.

Трафік Broadcast – широкомовна передача пакетів – забезпечує передачу даних всім абонентам *IP*-мережі, використовуючи спеціальну *IP*-адресу. Трафік *Broadcast* застосовується для передачі службової або іншої спеціальної інформації та не призначений для відправки відеоданих.

Трафік Multicast (групова передача пакетів) – забезпечує передачу відеоданих всім абонентам IP-мережі, використовуючи спеціальний клас IP-адрес. Всі абоненти можуть одночасно дивитися одну програму, а мережа не перевантажується. На відміну від трафіку *Broadcast*, абонент сам вибирає – приймати дані чи ні. Трафік *Multicast* дозволяє вести групову передачу пакетів багатьох каналів одночасно. У цьому випадку кількість каналів обмежується смугою пропускання головної магістралі мережі, а кількість абонентів практично не обмежена.

В мережах *IPTV* одночасно можуть бути присутні всі три види трафіку. Тому планування пропускної здатності мережі повинно враховувати самі несприятливі варіанти її завантаження.

Контрольні запитання

1. Які основні етапи аналог-цифрового перетворення відео, їх особливості?
2. Що позначає формат 4:2:2?
3. В чому полягають особливості цифрового представлення звукового супроводу?
4. Для чого призначено стиснення сигналу і які для цього застосовують методи?
5. Чим статистична надмірність відрізняється від фізіологічної?
6. Які параметри характеризують методи стиску?
7. Які основні етапи передбачені в методах стиску?
8. Для чого призначені та в чому полягають особливості стандартів сімейства *MPEG?*
9. Які існують стандарти цифрового телевізійного мовлення, їх призначення та особливості?
10. Які мережі застосовують для розподілу програм телемовлення?

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Головін Ю. О. Основи радіозв’язку : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Політехніка, 2021. 234 с.

2. Пахтусов В. В. Основи побудови засобів радіозв’язку : навч. посіб. Київ : ВІТІ, 2004. 292 с.

3. Омелянюк І. В. Цифрове ефірне телебачення. Практика, нові напрямки розвитку цифрового ефірного телебачення та створення цифрових ефірних телемереж : посібник для фахівців телебачення. Київ : ЗАО ТЕЛЕРАДІОКУР’ЄР, 2009. 192 с.

4. Ступак В. С., Долматов С. О. Основи радіочастотного контролю : практ. посіб. / за ред. Олійника В. Ф. Київ, 2004. 231 с.

5. Довгий С. О., Воробієнко П. П., Гуляєв К. Д. Сучасні телекомуніка-ції : Мережі, технології, безпека, економіка, регулювання. 2-ге вид., доп. / за ред. Довгого С.О. Київ : Азимут-Україна, 2013. 608 с.

6. Брагин А. С. Передающие устройства систем радиосвязи : уч. пособ. Киев : КВВИУС, 1987. 365 с.

7. Про електронні комунікації : Закон України від 16.12.2020 № 1089-IX. Київ : Офіційний вісник України. 2021. № 6.

8. Регламент радиосвязи : статьи. ITU, Женева, 2016. 430 с.

9. Rec. ITU-R SM.328-11 : Spectra and bandwidth of emissions. 91 p.

10. ГОСТ 30318-95 : Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к ширине полосы радиочастот и внеполосным излучениям радиопередатчиков. Методы измерений и контроля. Москва : Стандартинформ, 1995. 35 с.