

## *Лабораторна робота №2*

# **ПРИЙОМ ТА АНАЛІЗ РАДІОСИГНАЛУ FM ДІАПАЗОНУ ЗА ДОПОМОГОЮ SDR ПРИЙМАЧА НА БАЗІ RTL2823**

### **Мета роботи:**

1. Практичне ознайомлення з SDR приймачем на базі чіпа RTL2823 та програмним забезпеченням SDRSharp.
2. Підключення SDR приймача RTL2823 до компютера.
3. Прийом сигналу від радіостанцій в FM діапазоні, визначення характеристик сигналу.
4. Ознайомлення з функціональними можливостями ПЗ SDRSharp.

### **1 Короткі теоретичні відомості**

Для роботи з SDR приймачами існує багато програм. Більшість заточені під виконання конкретних завдань. В циклі лабораторних робіт нам буде потрібно просто моніторити ефір. Дані завдання добре виконують три найбільш популярні програми: SDRSharp, HDSDR і SDR Touch, яка написана під Andoid.

Ми будемо працювати з останню версією програми SDRSharp, так як вона має найбільш привабливий і простий зовнішній вигляд. До того ж, для неї написано безліч плагінів, які будуть корисними в роботі з донглом (приймач що підключається до комп'ютера). Дану програму може встановити як звичний користувач Windows, так і на ОС з ядром Linux.

#### **1.1 Модуляція та її різновиди. Формування модульованих сигналів**

Формування модульованих сигналів (модуляція) передбачає взаємодію двох сигналів: керуючого модулюючого і допоміжного несучого. Суть керуючого впливу модульованого сигналу полягає в тому, що деякі параметри несучого коливання змінюються відповідно до модулюючого коливання. Іншими словами передана інформація закладена у модульованому сигналі, а роль переносника інформації виконує високочастотне коливання, зване несучим (модульованим). Сигнал (в теорії інформації і зв'язку) - носій інформації, використовуваний для передачі повідомлень в системі зв'язку. Сигнал може генеруватися, але його прийом не обов'язковий, на відміну від повідомлення, яке розраховане на прийняття приймаючою стороною, інакше воно не є повідомленням. Сигналом може бути будь-який фізичний процес,

параметри якого змінюються (або перебувають) у відповідності з переданим повідомленням. В результаті модуляції спектр низькочастотного сигналу переноситься в область високих частот. Це дозволяє при організації мовлення налаштувати функціонування всіх приймально-передавальних пристроїв на різних частотах з тим, щоб вони «не заважали» один одному. Спектр (лат. Spectrum «бачення») - розподіл значень фізичної величини (зазвичай енергії, частоти або маси). Зазвичай під спектром мається на увазі електромагнітний спектр - розподіл інтенсивності електромагнітного випромінювання за частотами або по довжинах хвиль. В науковий обіг термін «спектр» ввів Ньютон в 1671-1672 роках для позначення багатобарвної смуги, схожою на веселку, яка виходить при проходженні сонячного променя через трикутну скляну призму.

В науковий обіг термін «спектр» ввів Ньютон в 1671-1672 роках для позначення багатобарвної смуги, схожою на веселку, яка виходить при проходженні сонячного променя через трикутну скляну призму.

Сигнал частоти - сигнал, один або кілька параметрів якого змінюються в процесі модуляції. Кількісна зміна параметра (параметрів) визначається миттєвим п оточним значенням інформаційного (модулюючого) сигналу[3]. В якості несучого може бути використаний будь-який стаціонарний сигнал. Найчастіше в якості несучого сигналу використовується високочастотне (щодо вищої частоти в спектрі інформаційного сигналу) гармонійне коливання, що обумовлено простотою демодуляції і відносно вузьким спектром результуючого модульованого сигналу. Однак, в деяких випадках використовують інші форми

несучого сигналу, наприклад, послідовність прямокутних імпульсів.

В якості несучого можуть бути використані коливання різної форми (прямокутні, трикутні і т. д.), Проте найчастіше застосовуються гармонійні коливання. Залежно від того, який з параметрів несучого коливання змінюється, розрізняють вид модуляції (амплітудна, частотна, фазова та ін.). Модуляція дискретним сигналом називається цифровою модуляцією або маніпуляцією.

У системах зв'язку в якості керуючих коливань використовуються різноманітні первинні електричні сигнали (ПЕС): телефонні, телеграфні, телевізійні та ін.

В якості несучих широко застосовуються гармонійні сигнали, власна частота яких  $\omega_0$  значно перевершує верхню частоту  $\omega_{\max}$  спектра модулюючого коливання. Це означає, що по відношенню до несучого коливання модульоване коливання повільно змінює свої значення в часі. Повільність зміни  $s_c(t)$  підкреслює, що на період модулюючого коливання припадають тисячі, сотні тисяч і більше періодів несучого коливання. При цьому, з одного боку, забезпечується досить повне відображення модулюючого коливання в несучому коливанні, а з іншого, обумовлюється вузькосмужність спектра модульованого коливання[4].

Таким чином, для передачі інформації, що міститься в ПЕС, використовується допоміжне несуче коливання, яке виконує роль переносника повідомлення

$$S_x(t) = A \cos(\omega_x t + \varphi_x) \quad (1.1)$$

$$\omega_x = 2\pi f_x \quad (1.2)$$

Зазвичай вважають  $f_x \gg k \cdot F_1$ , де  $F_1$  - найвища гармоніка ПЕС.

Процес зміни одного або декількох параметрів високочастотного (несучого) коливання відповідно до первинного (модулюючого) сигналу називається модуляцією. Дискретну модуляцію зазвичай називають маніпуляцією.

При модуляції інформаційними параметрами несучого коливання

$$S_x(t) = A \cos(\omega_x t + \varphi_x) \quad (1.3)$$

можуть бути амплітуда  $A$ , частота  $\omega_x$  або фаза  $\varphi_x$ , які змінюються відповідно за модулюючим сигналом, тому розрізняють амплітудну модуляцію (АМ), частотну модуляцію (ЧМ) і фазову модуляцію (ФМ).

У модульованих коливаннях параметри, що змінюються мають вигляд:  
при амплітудній модуляції

$$A(t) = A + \Delta A(t) = A + a s_c(t) \quad (1.4)$$

при частотній модуляції

$$\omega_x(t) = \omega_0 + \Delta \omega(t) = \omega_0 + a s_c(t) \quad (1.5)$$

де  $\Delta A_m(t), \Delta \omega(t), \Delta \varphi(t)$  - збільшення, пропорційні модулюючому коливанню  $s_c(t)$   $a$ ; - коефіцієнт пропорційності.

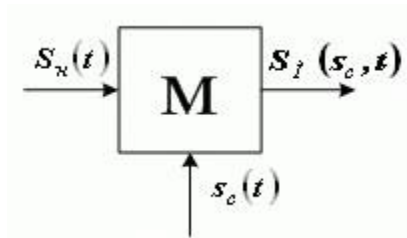


Рис. 1.1 Узагальнена схема модуляції

$s_x(t)$  Пристрій для отримання  $s_c(t)$   
результуючого(модульованого) сигналу  
 $s_M(s_c, t)$  називається модулятором, на один вхід якого подається несуче (модульоване) коливання, на другий вхід первинний (модулюючий) сигнал.

Гармонійні коливання - коливання, при яких фізична величина змінюється з часом за гармонійним (синусоїдальним, косинусоїдальним) законом.

Математичне пояснення:

Рівняння гармонійного коливання має вигляд

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.6)$$

або

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.7)$$

де  $x$  - відхилення величини, що коливається в поточний момент часу  $t$  від середнього за період значення (наприклад, в кінематиці - зміщення, відхилення коливальної точки від положення рівноваги);  $A$  - амплітуда коливання, тобто максимальне за період відхилення величини, що коливається від середнього за період значення, розмірність  $A$  збігається з розмірністю  $x$ ;  $\omega$  (радіан / с, градус / с) - циклічна частота, що показує, на скільки радіан (градусів) змінюється фаза коливання за 1 с;  $(\omega t + \varphi)$  (радіан, градус) - повна фаза коливання (скорочено - фаза, не плутати з початковою фазою);  $\varphi$  (радіан, градус) - початкова фаза коливань, яка визначає значення повної фази коливання (і самої величини  $x$ ) в момент часу  $t = 0$ .

Диференціальне рівняння, що описує гармонійні коливання, має вигляд

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \quad (1.8)$$

Будь-яке нетривіальне рішення цього диференційного рівняння - гармонійне коливання з циклічною частотою  $\omega$ .

## 1.2 Амплітудна модуляція. Її різновиди, математичне та теоретичне підґрунття, а також сфера застосування.

### 1.2.1 Амплітудна модуляція.

Амплітудна модуляція - вид модуляції, при якій змінним параметром несучого сигналу є його амплітуда.

Амплітудна модуляція - процес зміни амплітуди несучого коливання, що відповідає зміні безпосередньо безперервного інформаційного сигналу[5].

При амплітудній модуляції миттєва амплітуда несучого коливання:

$$A(t) = A_0 + \alpha s_c(t) \quad (1.9)$$

де -  $A_0$  амплітуда несучої;  $\alpha$  - коефіцієнт пропорційності, який обирається так, щоб амплітуда  $A(t)$  завжди була позитивною. Частота і фаза несучого гармонійного коливання при АМ залишаються незмінними.

Для математичного опису АМ сигналу замість коефіцієнта  $\alpha$ , що залежить від конкретної схеми модулятора, вводиться індекс модуляції:

$$m_{AM} = \frac{(A_{\max} - A_{\min})}{(A_{\max} + A_{\min})} \quad (1.10)$$

тобто відношення різниці між максимальним і мінімальним значеннями амплітуд АМ сигналу до суми цих значень. Для симетричного модулюючого сигналу АМ сигнал також симетричний, тобто  $A_{\max} = A_{\min} = 2\Delta A$ . Тоді індекс

модуляції дорівнює відношенню максимального збільшення амплітуди, до амплітуди несучої.

$$m_{AM} = \frac{\Delta A}{A_0} \quad (1.11)$$

Фізично індекс модуляції характеризує собою глибину амплітудної модуляції і може змінюватися в межах  $0 \leq m_{AM} \leq 1$ .

Таким чином для будь-якого АМ сигналу справедливо:

$$S_{AM}(s_c, t) = A_0 [1 + m_{AM} s_c(t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1.12)$$

Амплітудна модуляція гармонійного коливання. У найпростішому випадку  $\Omega \ll \omega_0$  модулюючий сигнал є гармонійним коливанням з частотою  $\Omega$ . При цьому вираз

$$S_{AM}(s_c, t) = A_0 [1 + m_{AM} \cos \Omega t] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1.13)$$

відповідає однотональному АМ сигналу, представлениму нижче

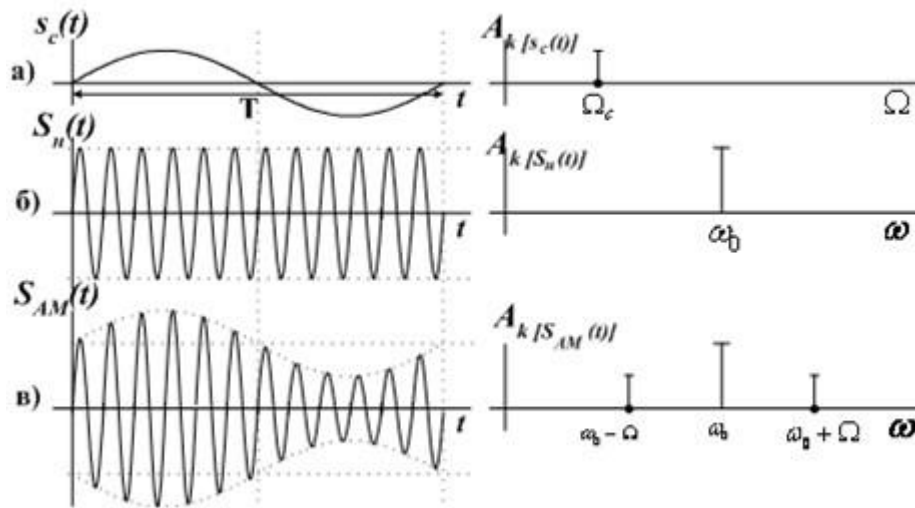


Рис. 1.2 Тимчасові спектральні діаграми процесу формування АМ гармонійного колювання

Аналогова модуляція застосовується для передачі дискретних даних по каналах з вузькою смугою частот, типовим представником яких є канал тональної частоти, наданий у розпорядження користувачам загальних телефонних мереж. Цей канал передає частоти в діапазоні від 300 до 3400 Гц, таким чином, його смуга пропускання дорівнює 3100 Гц. Хоча людський голос має набагато більш широкий спектр – приблизно від 100 Гц до 10 кГц, – для прийнятної якості передачі мови діапазон у 3100 Гц є гарним рішенням. Строге обмеження смуги пропускання тонального каналу пов'язано з використанням апаратури ущільнення і комутації каналів у телефонних мережах. Пристрій, що виконує функції модуляції несучої синусоїди на стороні, яка передає сигнали, і демодуляції на прийомній стороні, називається модемом (модулятордемодулятор) [6].

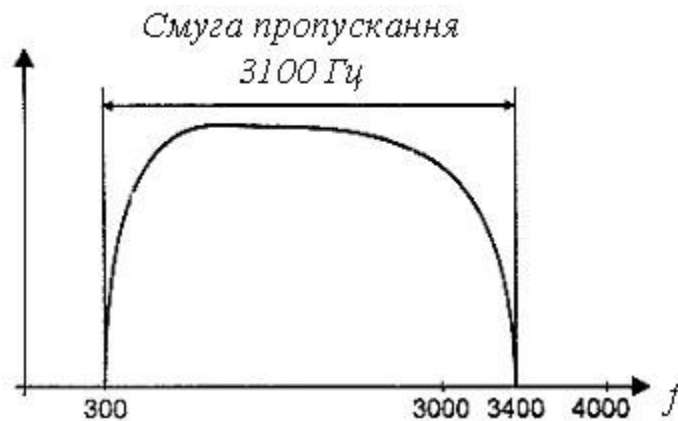


Рис. 1.3 Амплітудно-частотна характеристика каналу тональної частоти

Аналогова модуляція є таким способом фізичного кодування, при якому інформація кодується зміною амплітуди, фази чи частоти синусоїдального сигналу несучої частоти. На діаграмі показана послідовність бітів вихідної інформації, подана потенціалами високого рівня для логічної одиниці і



потенціалом нульового рівня для логічного нуля. Такий спосіб кодування називається потенційним кодом, що часто використовується при передачі даних між блоками комп'ютера[7].

При амплітудній модуляції для логічної одиниці вибирається один рівень амплітуди синусоїди несучої частоти, а для логічного нуля – інший. Цей спосіб рідко використовується в чистому вигляді на практиці через низку завадостійкості, але часто застосовується в поєднанні з іншим видом модуляції – фазовою модуляцією.

При частотній модуляції значення 0 і 1 вихідних даних передаються синусоїдами з різною частотою –  $f_0$  і  $f_1$ . Цей спосіб модуляції не потребує складних схем у модемах і звичайно застосовується в низькошвидкісних модемах, що працюють на швидкостях 300 чи 1200 біт/с.

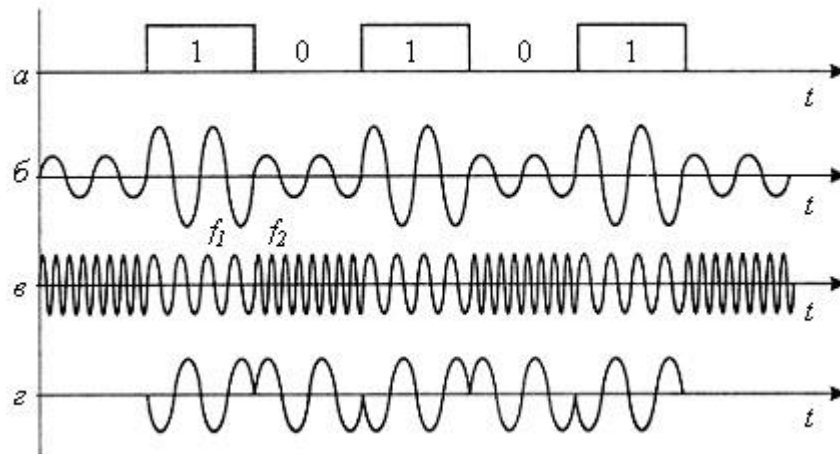


Рис. 1.4 Різні види модуляції

При фазовій модуляції значенням даних 0 і 1 відповідають сигнали однакової частоти, але з різною фазою, наприклад 0 і 180 градусів чи 0, 90, 180 і 270 градусів.

У швидкісних модемах часто використовуються комбіновані методи модуляції, як правило, амплітудна в поєднанні із фазовою[7].

Порівняння спектрів сигналів з різними видами модуляції.

Спектр результуючого модульованого сигналу залежить від типу модуляції і швидкості модуляції, тобто бажаної швидкості передачі бітів вихідної інформації.

Розглянемо спочатку спектр сигналу при потенційному кодуванні. Нехай логічна одиниця кодується позитивним потенціалом, а логічний нуль – негативним потенціалом такої ж величини. Для спрощення обчислень припустимо, що передається інформація, яка складається з нескінченної послідовності одиниць і нулів, що чергуються, як це і показано на рис 1.5, а. Зауважимо, що в даному випадку величини бодів і бітів у секунду збігаються.

Для потенційного кодування спектр безпосередньо виходить з формул Фур'є для періодичної функції. Якщо дискретні дані передаються з бітовою швидкістю  $N$  біт/с, то спектр складається з постійної складової нульової частоти і нескінченного ряду гармонік з частотами  $f_0, 3f_0, 5f_0, 7f_0, \dots$ , де  $f_0 = N/2$ . Амплітуди цих гармонік зменшуються досить повільно – з

коефіцієнтами  $1/3, 1/5, 1/7, \dots$  від амплітуди гармоніки  $f_0$ . В результаті спектр потенційного коду потребує для якісної передачі широку смугу пропускання.

Крім того, потрібно врахувати, що реально спектр сигналу постійно змінюється

в залежності від того, які дані передаються по лінії зв'язку. Наприклад, передача

довгої послідовності нулів чи одиниць зміщує спектр у бік низьких частот, а в

крайньому випадку, коли передані дані складаються тільки з одиниць (чи тільки

з нулів), спектр складається з гармоніки нульової частоти. При передачі одиниць, що чергуються, і нулів постійна складова відсутня. Тому спектр результуючого сигналу потенційного коду при передачі довільних даних займає смугу від деякої величини, близької до 0 Гц, до приблизно  $7f_0$  (гармоніками з частотами вище  $7f_0$  можна знехтувати через їх малий внесок у результуючий сигнал)[8].

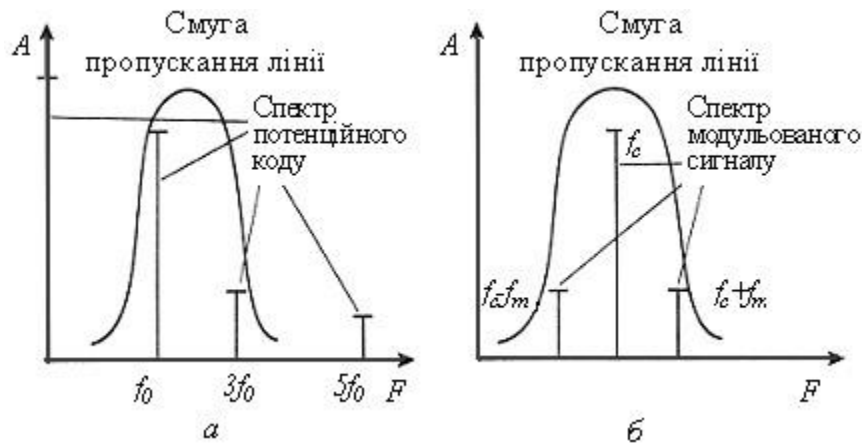


Рис. 1.5 Амплітуда модуляції неперервного процесу

Для каналу тональної частоти верхня границя при потенційному кодуванні досягається для швидкості передачі даних у 971 біт/с, а нижня неприйнятна для будь-яких швидкостей, тому що смуга пропускання каналу починається з 300 Гц. У результаті потенційні коди на каналах тональної частоти ніколи не використовуються.

При амплітудній модуляції спектр складається із синусоїди несучої частоти  $f_c$  і двох бічних гармонік:  $(f_c + f_m)$   $(f_c - f_m)$  і, де  $f_m$  – частота зміни інформаційного параметра синусоїди, що збігається зі швидкістю

передачі даних при використанні двох рівнів амплітуди. Частота  $f_m$  визначає пропускну здатність лінії при даному способі кодування. При невеликій частоті модуляції ширина спектра сигналу буде також невеликою

(рівною  $2f_m$ ), тому сигнали не будуть спотворюватися лінійно, якщо її смуга пропускання буде більша чи дорівнюватиме  $2f_m$ . Для каналу тональної частоти такий спосіб модуляції прийнятний при швидкості передачі даних не більше  $3100/2=1550$  біт/с. Якщо ж для подання даних використовуються 4 рівні амплітуди, то пропускна здатність каналу підвищується до 3100 біт/с.

При фазовій і частотній модуляції спектр сигналу виходить більш складним, чим при амплітудній модуляції, тому що бічних гармонік тут утвориться більш двох, але вони також симетрично розташовані щодо основної несучої частоти, а їх амплітуди швидко зменшуються. Тому ці види модуляції також добре підходять для передачі даних по каналу тональної частоти.

Для підвищення швидкості передачі даних використовують комбіновані методи модуляції. Найбільш розповсюдженими є методи квадратурної амплітудної модуляції (Quadrature Amplitude Modulation, QAM). Ці методи основані на поєднанні фазової модуляції з 8 значеннями величин зміщення фази й амплітудної модуляції з 4 рівнями амплітуди. Однак з можливих 32 комбінацій сигналу використовуються далеко не всі. Наприклад, у кодах Трелліса припустимі всього 6, 7 чи 8 комбінацій для подання вихідних даних, а інші комбінації є забороненими. Така надмірність кодування потрібна для розпізнавання модемом помилкових сигналів, що є наслідком перекручувань через перешкоди на телефонних каналах, які комутуються дуже значними за амплітудою і тривалими за часом[9].

### 1.2.2 Імпульсна модуляція

В імпульсній модуляції як носій модульованих сигналів використовуються послідовності імпульсів, як правило – прямокутних. У бездротових системах передачі даних в радіозв'язку ці послідовності заповнюються

високочастотними коливаннями, створюючи тим самим подвійну модуляцію. Як правило, ці види модуляції застосовуються при передачі дискретизованих даних.

У залежності від вигляду модульованого параметра розрізняють такі види

модуляції.

1. Амплітудно-імпульсна модуляція (АІМ),  $A$  – var.
2. Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ),  $\tau_2$  – var.
3. Фазово-імпульсна модуляція (ФІМ),  $\tau_1$  – var, тобто змінюється положення імпульсу на інтервалі  $T$ .
4. Частотно-імпульсна модуляція (ЧІМ),  $f = 1/T$  – var.

Для прямокутних імпульсів найбільш широко використовуються амплітудно-імпульсна (АІМ) і широтно-імпульсна (ШІМ) модуляції[10].

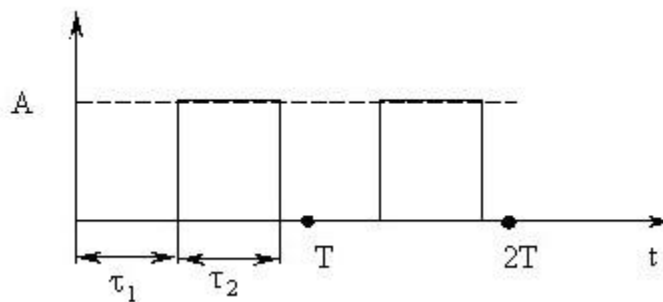


Рис. 1.6 Основні види імпульсної модуляції

Модуляцію розрізняють також за характером зв'язку між вхідним (модулюючим) сигналом і модульованим параметром на модуляцію I-го, II-го роду.

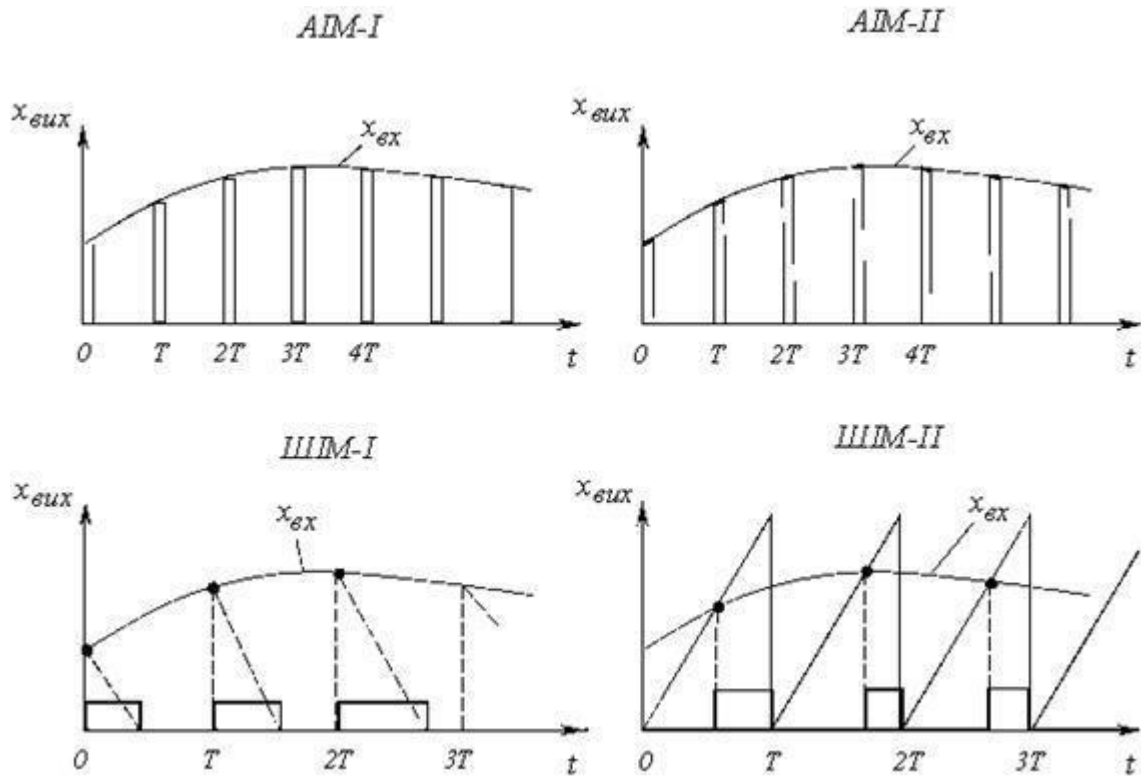


Рис. 1.7 Види імпульсної модуляції за характером зв'язку між вхідним сигналом і модульованим параметром

Якщо модульований параметр визначається значеннями вхідного сигналу у фіксовані, рівновіддалені один від одного моменти часу (тактові), то це модуляція першого роду (AIM-I, ШИМ-I і т. д.) Якщо значення модульованого параметра визначаються деяким функціоналом від вхідного сигналу, або визначаються в результаті розв'язання трансцендентних рівнянь, то це модуляція другого роду (AIM-II, ШИМ-II і т. д.) Іншими словами, якщо модульований параметр у процесі існування імпульсу залишається постійним, то це модуляція першого роду, якщо ж модульований параметр змінюється відповідно до поточного значення вхідного сигналу – то це модуляція другого роду.

Модуляційною характеристикою імпульсного елемента називається залежність величини модульованого параметра імпульсної послідовності від

відповідних дискретних значень вхідної величини. Ця характеристика може бути лінійною або нелінійною. ШІМ і ЧІМ нелінійні за своєю природою. Так, для ШІМ найменша тривалість імпульсу дорівнює нулю, а найбільша – періоду  $T$ . Модуляційна характеристика може мати вигляд як на рис. 1.8.



Рис. 1.8 Приклад модуляційної характеристики

Як зазначалось, АІМ полягає в зміні збільшення амплітуди імпульсів пропорційно функції керуючого сигналу при постійній тривалості імпульсів і періоді їхнього проходження:

$$U(t) = U_0 + ks(t), \quad i = const, \quad T = const. \quad (1.14)$$

Спектр АІМ розглянемо на прикладі модулювання одотонального сигналу  $s(t)$ . Напишемо рівняння модульованого сигналу в такій формі:

$$u(t) = (1 + M \cos(\omega t)) f(t), \quad (1.15)$$

де  $f(t)$  – періодична послідовність прямокутних імпульсів із частотою  $\omega$ ,

яку можна апроксимувати за Фур'є (без врахування фази):

$$f(t) = U_0 + U_n \cos(n\omega t). \quad (1.16)$$

Підставляючи значення  $f(t)$  у вираз для  $u(t)$ , одержуємо:

$$u(t) = (1 + M \cos(\omega t))U_0 + U_n \cos(n\omega t)(1 + M \cos(\omega t)), \quad (1.17)$$

У цілому спектр нескінченний, що визначається нескінченністю спектра прямокутних імпульсів. З'являються бічні складові, що відповідають спектру моделюючої функції (при багатотональному сигналі – бічні смуги спектрів). При додатковому високочастотному заповненні імпульсів весь спектр зміщується в область високих частот на частоту заповнення.

Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ, в англійській термінології pulse width modulation, PWM), що іноді називають модуляцією за тривалістю імпульсів, полягає в керуванні тривалістю імпульсів пропорційно функції керуючого сигналу при постійних амплітуді імпульсів і періоді проходження по фронту імпульсів:

$$t = t_0 + ks(t), \quad U = const, \quad T = const. \quad (1.18)$$

Розглянемо виконання ШІМ у найпростішому варіанті на прикладі гармонічного коливання. Передана крива дискретизується, при цьому має значення як інтервал дискретизації, так і кількість рівнів квантування. При передачі даних прямокутні імпульси починаються в моменти дискретних відліків даних, а тривалість імпульсів встановлюється пропорційно значенню відліків, при цьому максимальна тривалість імпульсів не повинна перевищувати інтервал дискретизації даних.

Спектр сформованого сигналу ШІМ у початковій частині містить постійну складову середнього рівня сигналу й пік частоти гармоніки, закодованої в ШІМсигналі. Якщо виділити зі спектра ці дві складові, то відновлюється вихідний сигнал з похибкою квантування. Природно, що при



малому числі рівнів квантування похибка відновлення вихідного гармонічного сигналу дуже велика.

Відмітимо, що широтно-імпульсна модуляція з наступним виділенням постійної складової може досить ефективно використовуватися (і використовується) для спостереження за середнім рівнем сигналу й автоматичного регулювання його динамічного діапазону, як, наприклад, у системах установки гучності звуку і яскравості кольорів і зображення в цілому в сучасних телевізійних установках.

Часова імпульсна модуляція є девіацією імпульсів по часовій осі за законом сигналу, що модулює, і власне кажучи аналогічна кутовій модуляції гармонійної несучої. Вона також може бути фазовою (ФІМ) або частотною (ЧІМ).

Кодово-імпульсна модуляція полягає в тому, що в точках дискретизації модулюючого сигналу виконується квантування його значень і кодування квантованих значень, як правило, у двійковій системі числення. Кодовані значення потім передаються за допомогою відповідної кодової послідовності стандартних символів[11].

### 1.2.3. Однотональний АМ сигнал

Однотональний АМ сигнал можна представити у вигляді суми трьох гармонійних складових з частотами:  $\omega_0$  - несучої;  $\omega_0 + \Omega$  - верхній боковий і  $\omega_0 - \Omega$  - нижній боковий:

$$S_{AM}(s_c, t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{A_0 m_{AM}}{2} \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0] + \frac{A_0 m_{AM}}{2} \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0] \quad (1.19)$$

Спектральна діаграма однотонового АМ сигналу, симетрична щодо несучої частоти  $\omega_0$ . Амплітуди бокових коливань з частотами  $\omega_0 - \Omega$  та  $\omega_0 + \Omega$  однакові і навіть при  $m_{AM} = 1$  не перевищують половини амплітуди несучого коливання.

Гармонійні модульовані сигнали і відповідно однотоновий АМ сигнал на практиці зустрічаються не часто. У більшості випадків модульовані первинні сигнали  $s_c(t)$  є складними функціями часу. Будь-який складний сигнал  $s_c(t)$  можна представити у вигляді кінцевої або нескінченної суми гармонійних складових, скориставшись рядом або інтегралом Фур'є. Кожна гармонійна складова сигналу  $s_c(t)$  з частотою  $\Omega_i$  призведе до появи в АМ сигналі двох бічних складових з частотами  $\omega_0 \pm \Omega_i$ .

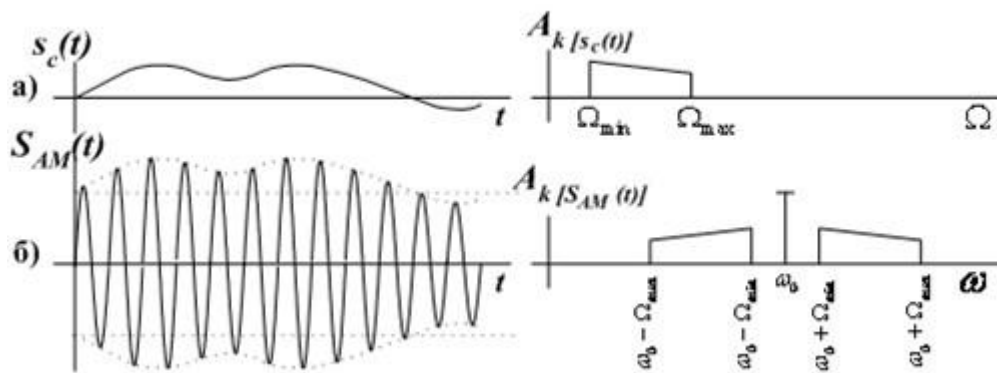


Рис. 1.9 Тимчасові спектральні діаграми АМ сигналу

Безлічі гармонійних складових у модульованому сигналі з частотами  $\Omega_i, i = 1, 2, \dots, N$  буде відповідати безліч бокових складових з частотами  $\omega_0 \pm \Omega_i, i = 1, 2, \dots, N$ . Спектр складномодульованого АМ сигналу, крім несучого коливання з частотою  $\omega_0$ , містить групи верхніх і нижніх бокових коливань, що утворюють відповідно верхню бокову смугу і нижню бокову смугу АМ сигналу.

При цьому верхня бокова смуга частот є масштабною копією спектра інформаційного сигналу, зрушеного в область високих частот на величину  $\omega_0$ .

Нижня бокова смуга частот також повторює спектральну діаграму сигналу  $s_c(t)$ , але частоти в ній розташовуються в дзеркальному порядку щодо несучої частоти  $\omega_0$ .

Ширина спектра АМ сигналу  $\Delta\omega_{AM}$  дорівнює подвоєному значенню найбільш високої  $\Omega_{max}$  частоти спектра модулюючого низькочастотного сигналу, тобто  $\Delta\omega_{AM} = 2\Omega_{max}$ .

Наявність двох бокових смуг обумовлює розширення займаної смуги частот приблизно в два рази, в порівнянні зі спектром інформаційного сигналу. Потужність, яка припадає на коливання несучої частоти, постійна. Потужність, укладена в бічних смугах, залежить від індексу модуляції і збільшується зі збільшенням глибини модуляції. Однак навіть в крайньому випадку, коли  $m_{AM} = 1$ , тільки  $\frac{1}{3}$  всієї потужності коливання доводиться на дві бічні смуги.

До перших спроб передачі мови і музики за допомогою радіохвиль методом амплітудної модуляції виконав у 1906 році американський інженер Р. Фессенден. У його дослідах несуча частота 50 кГц радіопередавача вироблялася електромашинним генератором (альтернатором), для її модуляції між генератором і антеною вклюджався вугільний мікрофон, змінював загасання сигналу в ланцюзі. З 1920 року замість електромашинних генераторів для генерації несучої частоти стали використовуватися генератори на електронних лампах. У другій половині 1930-х років, у міру освоєння ультракоротких хвиль, амплітуда модуляції поступово почала витіснятися з радіомовлення і радіозв'язку на УКХ частотною модуляцією.

З середини ХХ століття в службовому та аматорського радіозв'язку на всіх частотах почали застосовувати модуляцію з одною боковою смугою (ОБС), яка має ряд важливих переваг перед АМ, головне з яких - звуження в 2 рази смуги частот, займаної радіосигналом. У зв'язку з цим пропонувалося перевести на ОБС і масове радіомовлення, однак це вимагало б заміни всіх радіомовних приймачів на більш складні і дорогі, тому це не було здійснено.

В кінці ХХ століття почався перехід до цифрового радіомовлення з використанням сигналів з амплітудною маніпуляцією.

Нехай:

$u_m(t)$  - інформаційний (модулюючий) сигнал,

$u_c(t)$  - несучий (модульований) сигнал (несуче коливання).

Тоді амплітудно-модульований сигнал  $u_{am}(t)$  має вигляд:

$$u_{am}(t) = u_c(t) \left[ 1 + m \frac{u_m(t)}{|u_m(t)|_{\max}} \right]. \quad (1.19)$$

Якщо,

$$u_c(t) = U_c \cos(\omega_c t), \quad (1.20)$$

тоді

$$u_{am}(t) = U_c \left[ 1 + m \frac{u_m(t)}{|u_m(t)|_{\max}} \right] \cos(\omega_c t). \quad (1.21)$$

Тут  $m$  - деяка невід'ємна константа, звана коефіцієнтом модуляції.  
Формула

(1.19) описує що має сигнал  $u_c(t)$  , модульований по амплітуді сигналом

$u_m(t)$  з коефіцієнтом модуляції  $m$ .

Для неспотвореної модуляції необхідно виконання умови  $m \leq 1$ . Виконання цієї умови необхідно для того, щоб вираз в квадратних дужках у рівнянні вище завжди був позитивним. Якщо воно може приймати негативні значення в якийсь момент часу, то відбувається так звана перемодуляція (надлишкова модуляція). Прості демодулятори (типу квадратичного детектора) демодулюють такий сигнал з сильними спотвореннями.

#### 1.2.4 Балансна модуляція

Аналіз спектрального складу АМ сигналу показав, що первинний сигнал, що модулює знаходить своє відображення лише в складових бічних смуг спектра АМ сигналу. У процесі відображення первинного сигналу в модульованому коливанні складова спектра частоти  $\omega_0$  виконує лише роль своєрідного початку відліку для частот бічних спектральних складових. Тому її можна виключити із спектру сигналу, що передається і відновити на приймальному кінці.

Якщо модульоване колювання не містить складової несучої частоти  $\omega_0$ , то модуляцію називають балансною (БМ). Такий вид модуляції доцільний з енергетичної точки зору, оскільки на несучу припадає  $\frac{2}{3}$  всієї потужності модульованого колювання. За інших рівних умов вивільнена потужність дозволить реалізувати велику дальність зв'язку, або при колишній дальності поліпшити її якість.

#### 1.2.5 Односмугова модуляція

Балансна модуляція дозволяє більш раціонально розподілити енергію сигналу, однак ширина спектра  $\Delta\Omega_{\text{БМ}}$  залишається такою ж, як і для звичайної

амплітудної модуляції. У той же час симетрія спектру АМ сигналу означає, що верхня бічна смуга і нижня бічна смуга кожна окремо, по вністю відображають модульоване коливання. При цьому друга бічна смуга не несе ніякої додаткової інформації, вдвічі розширюючи спектр. Вид модуляції, при якому в спектрі амплітудно-модульованого коливання зберігається лише одна бічна смуга (верхня або нижня), називається односмуговою модуляцією.

Односмуговий сигнал  $s_{om}(t)$  з пригніченою нижньою бічною смугою має вигляд:

$$s_{om}(t) = k_n U \cos(\omega_0 t) + \frac{U}{2|u_m(t)|_{\max}} (u_m(t) \cos(\omega_0 t) - \hat{u}_m(t) \sin(\omega_0 t)), \quad (1.22)$$

Де  $k_n$ - коефіцієнт придушення амплітуди  $U$  несучого сигналу,  $\omega_0$ - кругова несуча частота,  $u_m(t)$  - сигнал, що модулює,  $|u_m(t)|_{\max}$  - максимальне значення модуля модулюючого сигналу,  $\hat{u}_m(t)$  сигнал, пов'язаний з Гильберту з  $u_m(t)$ . У разі подавленої несучої значення  $k_n \leq 0.01$  (– 40 дБ). У разі односмугової модуляції з пригніченою несучої для одноканальної аналогової телефонії такий режим називається ІЗЕ. Для придушення верхньої бокової смуги перед  $\hat{u}_m(t)$  ставиться знак плюс.

У радіосигналі з АМ 70% потужності передавача витрачається на випромінювання сигналу несучої частоти, який не містить ніякої інформації про модульований сигнал. Решта 30% діляться порівну між двома бічними частотними смугами, які представляють собою точне дзеркальне відображення одне одного. Таким чином, без жодного збитку для переданої інформації можна виключити з спектра сигналу несучу і одну з бічних смуг, і витратити всю потужність передавача для випромінювання лише інформативного сигналу.

Сигнал з односмуговою модуляцією займає в радіоефірі смугу частот вдвічі вужче, ніж амплітудно-модульований, що дозволяє більш ефективно використовувати частотний ресурс і підвищити дальність зв'язку. Крім того, коли на близьких частотах працюють кілька станцій з ОМ, вони не створюють один одному перешкод у вигляді биття, що відбувається при застосуванні амплітудної модуляції з неподавленою частотою.

Недоліком методу є відносна складність апаратури і підвищені вимоги до частотної точності і стабільності.

ОМ (SSB) через свою ефективності широко використовується в професійному і аматорського радіозв'язку на середніх хвилях. АМ в цій сфері вже майже не застосовується.

ОМ використовується в аналоговій апаратурі ущільнення телефонних каналів, наприклад, в таких поширених аналогових системах передачі, як К60П, К-300 та інших. У телефонних мережах загального користування аналогові системи були витіснені цифровими системами передачі на основі ІКМ, однак в ряді відомчих і військових систем як мінімум на території колишнього СРСР застосовується до цих пір.

Використання ОМ (SSB) призводить до суттєвого ускладнення і подорожчання приймальної радіоапаратури, тому в побутовому радіомовленні використання односмугової модуляції не набуло широкого поширення і було остаточно витіснене цифровим мовленням в стандарті DRM. Однією з причин відмови від SSB в радіомовленні також є вимога до високої стабільності і точності опорних генераторів як передавача, так і приймача. У разі невиконання цієї вимоги виникає характерне спотворення звукового сигналу, якісь «синтетичні» голоси. Це в міру допустимо для мовної інформації, але абсолютно неприйнятно для передачі музики.

Digital Radio Mondiale (DRM) - набір технологій цифрового радіомовлення, розроблених для мовлення в діапазонах, що

використовуються в даний час для мовлення з амплітудною модуляцією, зокрема на коротких хвилях. У порівнянні з амплітудною модуляцією DRM створює враження більшого числа каналів з більш високою якістю, використовуючи різні кодеки MPEG-4[15].

### **1.3 Частотна модуляція. Її різновиди, математичне та теоретичне підґрунтя, а також сфера застосування.**

Частотна модуляція (ЧМ, FM (англ. Frequency modulation)) - вид аналогової модуляції, при якому інформаційний сигнал управляє частотою несучого колювання. У порівнянні з амплітудною модуляцією тут амплітуда залишається незмінною.

Винахідником системи передачі сигналів методом частотної модуляції (ЧМ) вважається Корнеліус Д. Ерети (США, 1902 рік), але протягом майже 30 років цей винахід не знаходило практичного застосування. У 1933 році американський радіоінженер Едвін Армстронг запропонував використовувати широкосмугову ЧМ для радіомовлення.

ЧМ застосовується для високоякісної передачі звукового (низькочастотного) сигналу в радіомовленні (в діапазоні УКХ), для звукового супроводу телевізійних програм, передачі сигналів кольоровості в телевізійному стандарті SECAM, відеозапису на магнітну стрічку, музичних синтезаторах.

Висока якість кодування аудіосигналу обумовлено тим, що в радіомовленні при ЧМ застосовується велика (в порівнянні з шириною спектра сигналу АМ) девіація несучого сигналу, а в приймальній апаратурі використовують обмежувач амплітуди радіосигналу для усунення імпульсних перешкод. Така модуляція називається широкосмуговою ЧС. В радіозв'язку застосовується вузькосмугова ЧМ з невеликою девіацій частоти несучого сигналу.



Частотна модуляція - процес зміни миттєвої частоти несучого коливання відповідно до зміни інформаційного сигналу:

$$\omega(t) = \omega_0 + aS_c(t) \quad (1.23)$$

Розглянемо найбільш простий спосіб однотональної частотної модуляції.

На рисунку нижче зображені тимчасові діаграми зміни миттєвої частоти і фази для однотональної частотної модуляції.

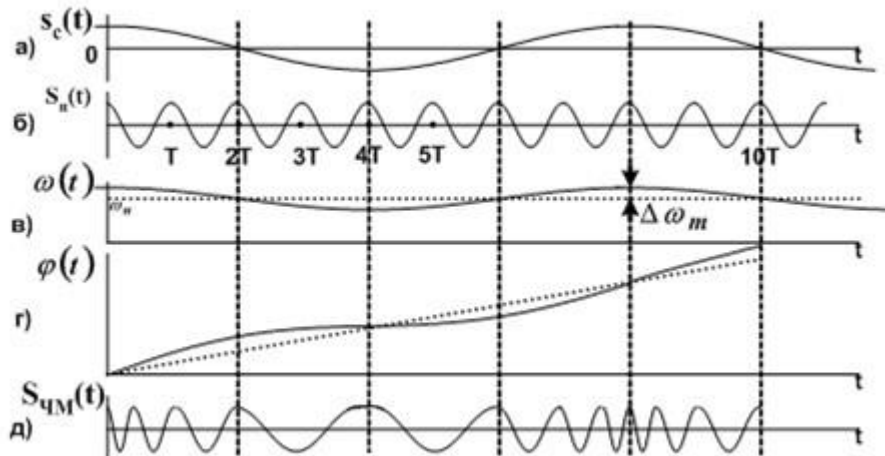


Рис. 1.10 Тимчасові діаграми процесу формування ЧМ сигналів

Інформаційний однотональний сигнал  $s_c(t) = A_0 \cos \Omega t$  модулює несуче коливання  $s_n(t)$  (рис. б), при цьому закон зміни миттєвої частоти несучого коливання  $\omega(t) = \omega_0 + aA_0 \cos \Omega t$  повторює закон зміни  $s_c(t)$  (рис. в). Тут  $aA_0 = \Delta \omega_m$  - девіація частоти, пропорційна амплітуді модулюючого коливання. Девіацією частоти називається максимальне відхилення частоти від середнього значення:

$$a|s_c(t)|_{\max} = \Delta \omega_m \quad (1.24)$$

Ставлення девіації частоти  $\Delta \omega_m$  до частоти модулюючого коливання  $\Omega$  називається індексом частотної модуляції:

$$m_{z\text{М}} = \frac{\Delta \omega_m}{\Omega} \quad (1.25)$$

У моменти часу  $t = 0, t = 8T$  миттєва частота максимальна, в момент  $t = 4T$  - мінімальна. Закон зміни миттєвої фази несучого коливання (рис.г) визначається інтеграцією

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega(t) dt \quad \varphi(t) = \omega_0 t + m_{z\text{М}} \sin \Omega t \quad (1.26)$$

З огляду на зв'язок частоти і фази, вираз для частотно-модульованого сигналу запишеться наступним чином:

$$S_{z\text{М}}(t) = A_0 \cos \left[ \int_0^t \omega(t) dt \right] = A_0 \cos \left[ \omega_0 t + a \int_0^t s_c(t) dt \right] \quad (1.27)$$

Для тональної частотної модуляції формула вище приймає вид

$$S_{z\text{М}}(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + m_{z\text{М}} \sin \Omega t) \quad (1.28)$$


Порівняння виразів показує, що при ФМ приріст фази пропорційно модулюючому коливанию  $s_c(t)$ , а при ЧМ - інтегралу від  $s_c(t)$ . Якщо спочатку

проінтегрувати  $s_c(t)$ , а потім цим коливанням модулювати несучу по фазі, то вийде ЧМ сигнал. Такий спосіб формування ЧМ сигналу застосовується практично. Подібним же чином, якщо продиференціювати  $s_c(t)$  і це коливання використовувати для модуляції частоти, то отримаємо ФМ сигнал[16].

## 2 Лабораторна установка

В даній лабораторній роботі лабораторна установка складається з: персонального комп'ютера, програмного забезпечення SDRSharp, SDR приймача на базі RTL2823.

## 3 Хід виконання роботи

- 4.1 Підєднайте SDR RTL8283 приймач до комп'ютера.
- 4.2 Запустіть ПЗ SDRSharp.
- 4.3 В інтерфейсі ПЗ SDRSharp відкрийте панель Source та виберіть RTL-SDR USB.
- 4.4 Відкрийте панель Radio та виберіть WFM
- 4.5 Налаштуйте ширину смуги пропускання(Bandwidth) в межах 100 – 200 кГц, за бажанням увімкніть придушення шуму(squelch) та запустіть прослуховування ефіру кнопкою .
- 4.6 Знайдіть радіостанції в діапазоні від 100 МГц до 108 МГц, запишіть їхні частоти в таблицю.
- 4.7 Запишіть в таблицю рівень сигналу для кожної з радіостанцій. Запишіть назву радіостанції яка відповідає кожній із знайдених частот(якщо буде така інформація).

## 4 Розрахункове завдання

Розрахункове завдання – див. п. 3.6 та 3.7.

## **5 Вимоги до звіту**

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

1. Коротке описання мети і методики проведення роботи.
2. Перелік використаних приладів та матеріалів.
3. Розрахункове завдання.
4. Висновки.

## **6 Контрольні питання**

1. Яка ширина смуги пропускання найкраще підходить для прийому радіостанції FM діапазону?
2. Навіщо потрібно регулювати ширину смуги пропускання?
3. Які ви знаєте види модуляцій сигналу?
4. Які види демодуляції доступні в ПЗ SDRSharp?
5. Для чого використовують модуляцію сигналу при передачі радіосигналів?
6. Який частотний діапазон FM радіо?