

## Лабораторна робота 7

### Приймання цифрових сигналів з використанням принципу оптимальної узгодженої фільтрації

#### 1. Мета лабораторної роботи

Дослідження ефективності використання в цифровій системі передавання інформації принципу оптимальної узгодженої фільтрації за трьох видів сигналів, коли їхня суміш з завадою є адитивною і спектри сигналу та завади є різними і повністю перекриваються (перебувають в одному частотному діапазоні).

Набути такі практичні знання та вміння:

1.1. Знати як змінюються можливості оптимальної узгодженої фільтрації у разі зміни форми сигналу.

1.2. Вміти складати методики і практично виконувати порівняльне дослідження ефективності принципу оптимальної узгодженої фільтрації для різних видів сигналів.

#### 2. Основні позначення, розрахункові формули та визначення

Боротьба з шумами і завадами є однією з найбільш важливих задач у багатьох областях радіотехніки. Забезпечити високу завадостійкість систем передачі інформації можна різними шляхами. Наприклад, створюють такі пристрою для обробки сигналів, які деяким найкращим чином виділяють сигнал, спотворений присутністю завади. Інший шлях полягає в удосконаленні структури переданих сигналів, використання завадостійких способів кодування і модуляції. Прикладами таких сигналів служать коди Баркера і сигнали з лінійною частотною модуляцією. Нагадаємо, що ці сигнали (коди Баркера, сигнали з лінійною частотною модуляцією, а також M-послідовності) є складними, так як база сигналу значно більше одиниці:

$$B = \Delta f \Delta t \gg 1, \quad (7.1)$$

у той час як для простих сигналів

$$B = \Delta f \Delta t \approx 1, \quad (7.2)$$

де  $\Delta t$  – тривалість імпульсу;  $\Delta f$  – ширина спектра.

Зокрема, для прямокутного відеоімпульсів  $\Delta f = \frac{1}{\tau_i}$  отже, виконується умова (7.2).

Для завдання виявлення сигналів в шумах найбільше поширення одержав критерій максимуму відношення сигнал/завада на виході фільтра. Вимоги до фільтру, можна сформулювати наступним чином. На вхід лінійного чотириполюсника з постійними параметрами і передатною

функцією  $K(j\omega)$  подається адитивна суміш сигналу  $s(t)$  і шуму  $n(t)$ . Сигнал повністю відомий; це означає, що задані його форма і положення на осі часу. В якості моделі шуму, на тлі якого спостерігається сигнал, зазвичай береться так званий білий шум. Під білим шумом розуміємо гауссівський випадковий процес  $\xi(t)$  з нульовим математичним очікуванням і дельтоподібною кореляційною функцією. Спектральна густина білого шуму

$$W(\omega) = \frac{N_0}{2}, \quad (7.3)$$

Таким чином, графічно спектральна густина білого шуму являє собою необмежену пряму, паралельну осі частот.

Потрібно синтезувати фільтр, що забезпечує отримання на виході найбільшого можливого відношення пікового значення сигналу до середньоквадратичного значення шуму. При цьому не ставиться умова збереження форми сигналу, так як для виявлення його в шумах форма не має значення.

Таким чином, завдання зводиться до відшукування оптимальної (в сенсі максимуму відношення сигнал/шум) передатної функції  $K(j\omega)$ .

Рішення даної задачі приводить до результату:

$$K(j\omega) = kS(\omega)e^{-j\omega t_0} \quad (7.4)$$

Отримане співвідношення повністю визначає передану функцію фільтра (частотний коефіцієнт передачі узгодженого фільтра), що забезпечує максимум відношення сигнал/завада. Дане рівність означає, що амплітудно-частотна характеристика узгодженого фільтра збігається з амплітудно-частотним спектром корисного сигналу. Множник пропорційності  $k$  визначає рівень посилення або ослаблення, внесеного фільтром.  $S^*(\omega)$  – функція, комплексно-спряжена спектральної щільності сигналу  $s(t)$ . Співмножник  $e^{-j\omega t_0}$  описує зсув вихідного відгуку фільтра по осі часу на величину  $t_0$  ( $t_0$  – відповідає моменту закінчення імпульсу).

Отже, функція  $K(j\omega)$ , що відповідає даній умові (7.4), узгоджена зі спектральними характеристиками сигналу - амплітудної і фазової. У зв'язку з цим оптимальний фільтр, що розглядається називають узгодженим.

Сигнал на виході узгодженого фільтра з точністю до постійного коефіцієнта збігається з кореляційної функцією вхідного сигналу. Отже, пікове значення сигналу

$$S_{\text{вих}}(t_0) = kR(0) = kE \quad (7.5)$$

Співвідношення піку сигналу до середньоквадратичного значення завади на виході узгодженого фільтра визначається рівністю

$$\frac{S_{\text{вих}}(t_0)}{\sigma_{\text{вих}}} = \sqrt{\frac{2E}{N_0}} \quad (7.6)$$

Таким чином, відношення сигнал/шум на виході узгодженого фільтра визначається відношенням енергії корисного сигналу  $E$  до спектральної

щільності потужності шуму  $\frac{N_0}{2}$  і не залежить від форми сигналу.

Відзначимо, що максимальне відношення сигнал/шум на виході узгодженого фільтра досягається в момент закінчення сигналу ( $t = t_0$ ).

Коефіцієнт стиснення, що забезпечується узгодженим фільтром (для складних сигналів)

$$K_{\text{ст}} = \frac{t_i}{t_{\text{вих}}} \quad (7.7)$$

## 2.1. Реалізація узгоджених фільтрів

Отримані раніше вирази, що визначають частотну та імпульсну характеристики узгодженого фільтра, дають можливість знайти фізичну структуру пристрою для оптимальної фільтрації сигналу відомої форми. Нижче на конкретних прикладах будуть показані деякі прийоми такого синтезу.

### 2.1.1. Узгоджений фільтр для прямокутного відеоімпульса

Розглянемо імпульсний сигнал  $s_{\text{вх}}(t)$ , що представляє собою відеоімпульс прямокутної форми з певною тривалістю  $\tau_i$  і довільною амплітудою  $U_0$ . Щоб знайти структуру фільтра, узгодженого з таким сигналом, використовуємо спектральний метод. Насамперед обчислимо спектральну щільність корисного сигналу:

$$S_{\text{вх}}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\text{вх}}(t)e^{-j\omega t} dt = U_0 \int_0^{\tau_i} e^{-j\omega t} dt = \frac{U_0}{j\omega} (1 - e^{-j\omega\tau_i}). \quad (7.8)$$

Звідси на підставі виразу (7.4) знаходимо частотний коефіцієнт передачі узгодженого фільтра, поклавши для конкретності  $t_0 = \tau_i$ , тобто що відгук фільтра максимальний у момент закінчення імпульсу:

$$K_{\text{узг}}(j\omega) = k \frac{1 - e^{j\omega\tau_i}}{-j\omega} e^{-j\omega\tau_i} = \frac{k}{j\omega} (1 - e^{-j\omega\tau_i}). \quad (7.9)$$

Отриманий результат дозволяє синтезувати узгоджений фільтр. Дійсно, згідно з виразом (7.2) такий фільтр має представляти собою каскадне з'єднання трьох лінійних ланок: а) масштабного підсилювача з коефіцієнтом підсилення  $k$ ; б) ідеального інтегратора; в) пристрою з коефіцієнтом передачі  $K^* = 1 - \exp(-j\omega\tau_i)$ . Останній пристрій реалізується за допомогою ланки затримки сигналу на час  $\tau_i$ , інвертора, що змінює знак сигналу, і суматора. Структурна схема фільтра зображена на рис. 7.1.

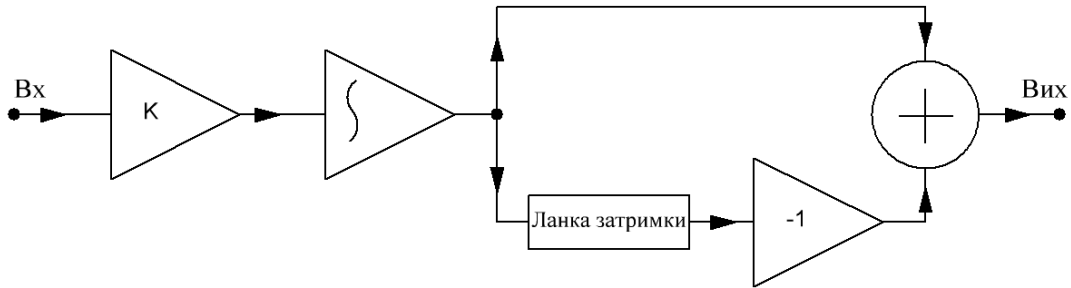


Рис. 7.1. Структурна схема узгодженого фільтра для прямокутного відеоімпульса

### 2.3.2. Узгоджений фільтр для пачки однакових відеоімпульсів

Часто, прагнучи збільшити енергію корисного сигналу, обробляють імпульси окремими пачками. Припустимо, що на виході амплітудного детектора приймача є пачка з  $N$  однакових відеоімпульсів тривалістю  $\tau_i$  кожен; інтервал між імпульсами дорівнює  $T$ , Якщо  $S_0(\omega)$  – спектральна щільність окремого імпульсу, то спектральна щільність пачки імпульсів

$$S_{\Pi}(\omega) = S_0(\omega)[1 + e^{-j\omega T} + e^{-j2\omega T} + \dots + e^{-j(N-1)\omega T}]. \quad (7.10)$$

Синтезуючи структуру узгодженого фільтра для пачки імпульсів, зажадаємо, щоб максимальний відгук виникав у момент закінчення останнього імпульсу пачки, звідки  $t_0 = (N - 1)T + \tau_i$ . Застосувавши формулу (7.4), знаходимо частотний коефіцієнт передачі узгодженого фільтра:

$$K_{\text{узг}}(j\omega) = kS_0^*(\omega)e^{-j\omega\tau_i}[1 + e^{j\omega T} + e^{j2\omega T} + \dots + e^{j(N-1)\omega T}]e^{-j(N-1)\omega T} = K_{0\text{узг}}(j\omega)[1 + e^{-j\omega T} + e^{-j2\omega T} + \dots + e^{-j(N-1)\omega T}], \quad (7.11)$$

де  $K_{0\text{узг}}(j\omega)$  – коефіцієнт передачі узгодженого фільтра для одиночного відеоімпульса.

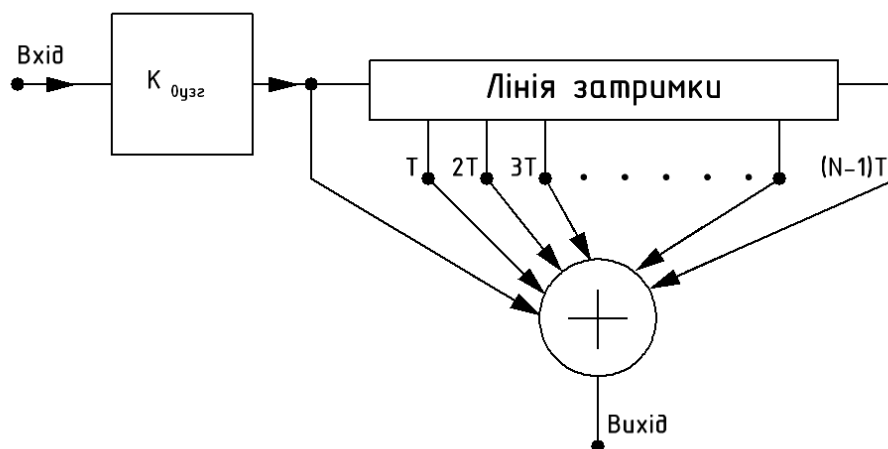


Рис.7.2. Структурна схема узгодженого фільтра для пачки відео імпульсів

Формула (7.11) безпосередньо визначає структурну схему узгодженого фільтра, зображену на рис. 7.2.

На вході розміщено узгоджений фільтр для одиночного відеоімпульса. Основою пристрою служить багатовиводна лінія затримки, що забезпечує запізнювання сигналів на відрізки часу  $T, 2T, \dots, (N - 1)T$ . Сигнали з усіх виводів надходять на суматор. Легко бачити, що максимальний відгук на виході суматора буде спостерігатися тоді, коли корисні сигнали від всіх імпульсів пачки одночасно опиняться на всіх його входах. Ефективність роботи пристрою тим вище, чим довше пачка.

Практично пристрої з використанням узгодженого фільтра сигналів містять також спеціальний нелінійний пороговий елемент, вхід якого з'єднаний з виходом суматора узгодженого фільтра. Рівень порогу трохи перевищує середньоквадратичне значення шуму при відсутності корисного сигналу. Якщо сплеск вихідного сигналу фільтра досягає порогового рівня, то на пристрій індикації надходить керуючий сигнал, який свідчить про наявність імпульсу.

### 2.3.3. Угоджений фільтр для сигналів Баркера

В цифрових системах передачі інформації велику популярність здобули так звані сигнали (коди) Баркера. Ці сигнали мають унікальну властивість: високе значення головного пелюстка автокореляційної функції і гранично низький рівень бічних пелюстків. Сигнали Баркера вдається реалізувати лише при числі позицій  $M = 2, 3, 4, 5, 7, 11$  і  $13$ .

### Постановка задач дослідження в лабораторній роботі

1. Перевірте твердження з теорії оптимальної узгодженої фільтрації про те, що осцилограма сигналу на виході оптимального узгодженого фільтра у разі подавання на його вхід «свого» сигналу відповідає його автокореляційній характеристиці.

2. Перевірте твердження з теорії оптимальної узгодженої фільтрації про те, що імпульсна характеристика оптимального узгодженого фільтра являє собою «дзеркальне відображення» «свого» вхідного сигналу, з яким цей фільтр є узгодженим.

3. Дослідіть умови приймання (виявлення) «свого» цифрового сигналу у разі надходження на вхід оптимального узгодженого фільтра адитивної суміші «свого» цифрового сигналу та сигналу завади. Як сигнал завади використовуйте флуктуаційну заваду (див. п. 4). Забезпечте виконання умов:

а) спектральні характеристики «свого» цифрового сигналу та сигналу завади повністю перекриваються;

б) відношення сигнал/шум дорівнює або є меншим від одиниці (у цій роботі відношення сигнал/шум доцільно оцінювати відношенням значень

«максимальний рівень сигналу» та «максимальний рівень, який досягає флуктуаційна завада»). Виконання цієї умови означає, що виявлення в суміші цифрового сигналу пороговим методом є неможливим.

#### 4. Опис лабораторного моделі

В лабораторній роботі для дослідження ефективності використання в цифровій системі передавання інформації принципу оптимальної узгодженої фільтрації використовується програмне середовище моделювання MicroCap 12.

Структурна схема лабораторної моделі зображена на рис. 7.4.

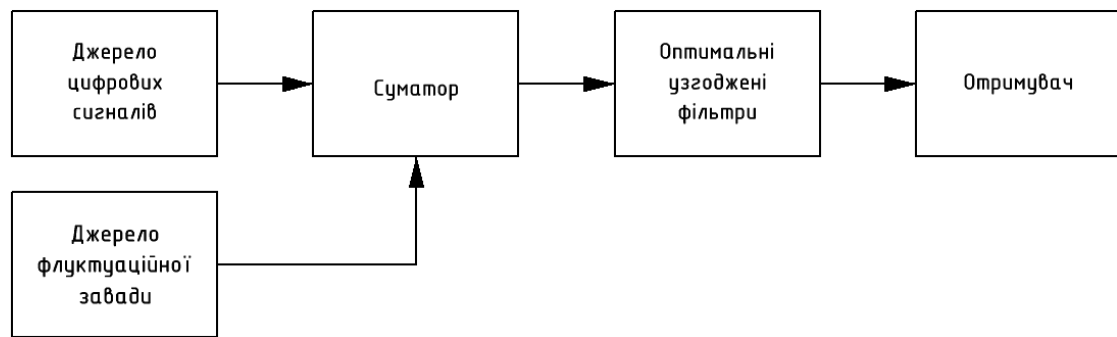


Рис. 7.4. Структурна схема лабораторної моделі

Для побудови функціональної схеми лабораторної моделі необхідно використати такі компоненти(табл.7.1):

Таблиця 7.1

Призначення	Компоненти	Шлях	Параметри
Джерело цифрових сигналів	Stim1	Component/Digital Primitives/Stimuls Generators/Stim1	.define GENERATOR1 +0us 1 +11us 0
Масштабний підсилювач	Amp	Component/Analog Primitives/Macros/Blocks/Amp	коефіцієнт підсилення $k$ Param:GAIN=
Ідеальний інтегратор	Int	Component/Analog Primitives/Macros/Diffentiators and Integrators/Int	
Лінія затримки	Delay	Component/Analog Primitives/Macros/Blocks/Delay	Час затримки (сек.) Param:DELAY=
Суматор	Sum,	Component/Analog	

	Sum3	Primitives/Macros/ Summers/Sum	
Інвертор	Amp	Component/Analog Primitives/Macros/ Blocks/Amp	коефіцієнт підсилення $k$ Param:GAIN=-1
Джерело флуктуаційної завади	Voltage Source	Component/Analog Primitives/Waveform Sources/Voltage Source	Noise
Отримувач	Resistor	Component/Analog Primitives/Passive Components/Resistor	R=50 Ом

У лабораторній роботі передбачено використання трьох цифрових сигналів однакової тривалості, які представляють такі одинадцятирозрядні кодові комбінації:

а) 11111111111;

б) 10101010101;

в) 11100010010 (у теорії електровз'язку останню кодову комбінацію називають «кодова комбінація Баркера» [1, с. 79-83; 4, с. 184-185; 5, с. 44-49]).

Осцилограми цих кодових комбінацій наведені на рис. 7.5.

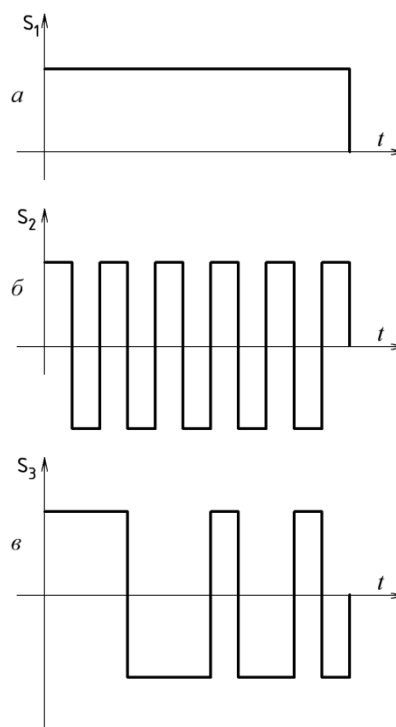


Рис.7.5. Осцилограми цифрових сигналів заданих кодових комбінацій

## 5. Методики, які необхідно скласти і використати під час виконання досліджень у цій лабораторній роботі

5.1. Методика виконання першої задачі дослідження згідно з п. 3.1.

5.1.1. На вхід оптимального узгодженого фільтра для цифрового сигналу кодової комбінації 1111111111 подайте «свій» цифровий сигнал (див. рис. 7.5, а).

5.1.2. За допомогою осцилографа спостерігайте сигнали на виходах «свого» і «чужих» оптимальних узгоджених фільтрів. Осцилограми вхідного та вихідних сигналів потрібно зарисувати.

5.1.3. На вхід оптимального узгодженого фільтра для цифрового сигналу кодової комбінації 1010101010 подайте «свій» цифровий сигнал (див. рис. 7.5, б).

5.1.4. За допомогою осцилографа спостерігайте сигнали на виходах «свого» і «чужих» оптимальних узгоджених фільтрів. Осцилограми вхідного та вихідних сигналів потрібно зарисувати.

5.1.5. На вхід оптимального узгодженого фільтра для цифрового сигналу кодової комбінації Баркера 11100010010 подайте «свій» цифровий сигнал (див. рис. 7.5, в).

5.1.6. За допомогою осцилографа спостерігайте сигнали на виходах «свого» і «чужих» оптимальних узгоджених фільтрів. Осцилограми вхідного та вихідних сигналів потрібно зарисувати.

5.1.7. Порівняйте отримані осцилограми на виходах «своїх» оптимальних узгоджених фільтрів з відомими з теорії автокореляційними характеристиками вхідних сигналів і зробіть відповідний висновок.

5.1.8. Для кожного цифрового сигналу порівняйте отримані осцилограми на виходах «свого» і «чужих» оптимальних узгоджених фільтрів. Чи можливо за допомогою порогових пристроїв, встановлених на виходах оптимальних узгоджених фільтрів розпізнавати появу свого сигналу

5.2. Методика виконання другої задачі дослідження згідно з п. 3.2

5.2.1. На вхід оптимального узгодженого фільтра для цифрового сигналу кодової комбінації 1111111111 подайте « $\delta$ -імпульс».

*Порада: Зверніть увагу, який Сигнал Вам пропонують як « $\delta$ -імпульс». Виміряйте параметри цього « $\delta$ -імпульсу» (амплітуду і тривалість) та зробіть висновок про його відповідність теоретичному поданню. Також подумайте і скажіть, за яких умов поданий сигнал можна вважати близьким до « $\delta$ -імпульс», тобто його можна використовувати для отримання імпульсної характеристики пристрою, який належить до лінійних радіоелектронних кіл*

5.2.2. За допомогою осцилографа спостерігайте сигнал на виході оптимального узгодженого фільтра. Осцилограми вхідного та вихідного сигналів потрібно зарисувати.

5.2.3. На вхід оптимального узгодженого фільтра для цифрового сигналу кодової комбінації 1010101010 подайте « $\delta$ -імпульс».



5.2.4. За допомогою осцилографа спостерігайте сигнал на виході оптимального узгодженого фільтра. Осцилограми вхідного та вихідного сигналів потрібно зарисувати.

5.2.5. На вхід оптимального узгодженого фільтра для цифрового сигналу кодової комбінації Баркера 11100010010 подайте « $\delta$ -імпульс».

5.2.6. За допомогою осцилографа спостерігайте сигнал на виході оптимального узгодженого фільтра. Осцилограми вхідного та вихідного сигналів потрібно зарисувати.

5.2.7. Порівняйте отримані осцилограми вхідних та вихідних сигналів і зробіть відповідний висновок.

5.3. Методика виконання третьої задачі дослідження згідно з п. 3.3.

5.3.1. Сформууйте адитивну суміш цифрового сигналу кодової комбінації 1111111111 та флуктуаційної завади з виконанням умов п. 3.3.

*Порада:* для формування адитивної суміші цифрового сигналу та флуктуаційної завади потрібно використати пристрій «Суматор».

5.3.2. Подайте цю адитивну суміш на вхід оптимального узгодженого фільтра для цифрового сигналу кодової комбінації 1111111111. Оцініть відношення сигнал/шум на його виході, а також зробіть висновок про можливість виявлення в суміші цифрового сигналу пороговим методом.

5.3.3. Сформууйте адитивну суміш цифрового сигналу кодової комбінації 101010101 та флуктуаційної завади з виконанням умов п. 3.3.

5.3.4. Подайте цю адитивну суміш на вхід оптимального узгодженого фільтра для цифрового сигналу кодової комбінації 101010101. Оцініть відношення сигнал/шум на його виході, а також зробіть висновок про можливість виявлення в суміші цифрового сигналу пороговим методом.

5.3.5. Сформууйте адитивну суміш цифрового сигналу кодової комбінації Баркера 11100010010 та флуктуаційної завади з виконанням умов п.3.3.

5.3.6. Подайте цю адитивну суміш на вхід оптимального узгодженого фільтра для цифрового сигналу кодової комбінації Баркера 11100010010. Оцініть відношення сигнал/шум на його виході, а також зробіть висновок про можливість виявлення в суміші цифрового сигналу пороговим методом.

5.3.7. На основі порівняння отриманих результатів зробіть висновок, який з трьох сигналів потрібно вважати найкращим для використання в цифрових системах передавання інформації.

## 6. Результати виконаних досліджень

Подання результатів досліджень повинно передбачати:

6.1. Згідно з п. 3.1 осцилограми: див. щ. 5.1.2, п. 5.1.4, 5.1.6 та висновки згідно з п. 5.1.7 та п. 5.1.8.

6.2. Згідно з п. 3.2 осцилограми: див. п. 5.2.2, п. 5.2.4, 5.2.6 та висновок

згідно з п. 5.2.7.

6.3. Визначені відношення сигнал/шум (див. п. 5.3.2, п. 5.3.4, 5.3.6) та висновок згідно з п. 5.3.7.

## 7. Висновки за результатами виконаних досліджень

Крім висновків, зроблених у п. 6.1, 6.2, 6.3, необхідно дати відповідь на такі запитання:

7.1. Яку характерну особливість має цифровий сигнал, який подає **кодову комбінацію Баркера**, порівняно з двома іншими цифровими сигналами, що розглядаються в цій роботі?

7.2. Яку особливість **імпульсної характеристики оптимальних узгоджених фільтрів** Ви виявили в експерименті?

7.3. Якому сигналу з трьох досліджуваних потрібно віддати перевагу під час використання в системі передавання інформації оптимальної узгодженої фільтрації і чому?

7.4. Яке практичне використання розглянутих сигналів у системах передавання інформації Ви можете запропонувати?

7.5. Який сигнал **Ви вважаєте ідеальним** під час використання в системі передавання інформації принципу оптимальної узгодженої фільтрації? Сформулюйте вимоги до ідеального сигналу.

7.6. Який з трьох досліджуваних Вами сигналів є найближчим до ідеального сигналу під час використання в системі передавання інформації оптимальної узгодженої фільтрації?

7.7. У Вас є оптимальний узгоджений фільтр, але невідомо для якого сигналу. Запропонуйте спосіб для визначення «свого» сигналу для оптимального узгодженого фільтра?

7.8. Які нові практичні знання і вміння отримали Ви після виконання цієї лабораторної роботи?

## Література

1.Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Высшая школа, 1988., с. 419-429.

2.Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Радио и связь, 1986. ,с. 396-413.

3.Кловский Д.Д. Теория передачи сигналов. - М.: Связь, 1973., с. 246-253.

4.Лезин Ю.С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем. - М.: Радио и связь, 1986. ,с. 75-90.

5.Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. - М.: Радио и связь, 1985

