

Державний комітет зв'язку та інформатизації України

Одеська національна академія зв'язку ім. О. С.Попова

Кафедра теорії електричного зв'язку ім. А.Г. Зюко

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт із дисципліни

“ПРИСТРОЇ ПРИЙМАННЯ ТА ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ”

ЗАТВЕРДЖЕНО
методичною радою
академії.
Протокол № 10
від 11.03.2003 р.

Одеса 2003

Рецензент – А. Ю. Дощечкін
Укладачі – П. В. Іващенко, В. Ю. Дирда,
М. Ф. Іванов, О. А. Решетняк
Відп. редактор – В. Ю. Дирда
Редактор – Л. А. Кодрул
Комп'ютерне верстання –

СХВАЛЕНО
на засіданні кафедри ТЕЗ
і рекомендовано до друку.
Протокол № 1
від 29 серпня 2003 р.

Зміст

ЛР 1	Вивчення схеми модема сигналу ВФМ-2 та вимірювання його характеристик	4
ЛР 2	Вивчення та вимірювання характеристик приймально-передавального тракту станції «Айсберг»	12
ЛР 3	Вивчення тракту ПЧ і демодулятора приймача ППСТ-78 і вимірювання їх характеристик	18
ЛР 4	Вивчення принципу і пристроїв розділення сигналів за формою	25
ЛР 5	Дослідження схем оптимальних демодуляторів сигналів двійкових видів модуляції	33
ЛР 6	Вивчення відносного кодування й декодування	40
ЛР 7	Дослідження завадостійкості оптимальних демодуляторів сигналів цифрових видів модуляції	48
ЛР 8	Дослідження демодулятора сигналу аналогової ЧМ	56

Лабораторна робота 1

ВИВЧЕННЯ СХЕМИ МОДЕМА СИГНАЛУ ВФМ-2 ТА ВИМІРЮВАННЯ ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИК

1 Мета роботи

1.1 Вивчення функціональних схем модулятора та демодулятора сигналу ВФМ-2.

1.2 Вивчення методики вимірювання та вимірювання основних характеристик модема сигналу ВФМ-2.

2 Ключові положення

2.1 Сигнал цифрової модуляції – це послідовність елементарних сигналів:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s_i^{(k)}(t - kT), \quad (1)$$

де $s_i^{(k)}(t)$, $i = 0, 1$, – i -й елементарний сигнал, що передається на k -му тактовому інтервалі;

T – тактовий інтервал.

Під час передавання цифрового сигналу $b(t)$ з тривалістю двійкового символу T_6 сигналом двійкової відносної фазової модуляції (ВФМ-2) елементарними сигналами є радіоімпульси, що відрізняються початковими фазами на кут π :

$$s_1(t) = \sqrt{2} A(t) \sin(2\pi f_0 t); \quad s_0(t) = \sqrt{2} A(t) \sin(2\pi f_0 t + \pi), \quad (2)$$

де $A(t)$ – обвідна радіоімпульсів, яка визначає спектр модульованого сигналу;
 f_0 – частота несінної, а $T = T_6$.

Формування сигналу ВФМ-2 полягає в наступному: до входу модулятора надходять символи 1 і 0; коли передається символ 1, то використовується елементарний сигнал, фаза якого відрізняється від фази попереднього на π ; коли передається символ 0, то використовується елементарний сигнал, фаза якого така ж, як і в попереднього. Іншими словами, під час передавання сигналом ВФМ-2 інформація міститься в різниці фаз сусідніх сигналів: різниця фаз дорівнює π , коли передається 1, і нулю, коли передається 0. Тому цей вид модуляції називають також двійковою фазо-різницевою модуляцією (ФРМ-2).

Для порівняння – у разі двійкової фазової модуляції (ФМ-2) інформація міститься у початкових фазах елементарних сигналів.

2.2 Модулятор сигналу ВФМ-2 будується шляхом каскадного з'єднання відносного кодера та модулятора сигналу ФМ-2 (рис.1).

Відносний кодер працює за правилом

$$b_k^{\text{відн}} = b_k \oplus b_{k-1}^{\text{відн}}, \quad (3)$$

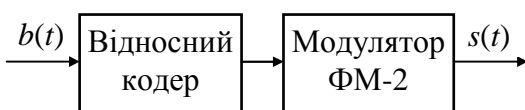


Рисунок 1 – Структурна схема модулятора сигналу ВФМ-2

де b_k – символ 1 або 0 на вході кодера на k -му тактовому інтервалі;

$b_k^{\text{відн}}$ – символ 1 або 0 на виході кодера на

k -му тактовому інтервалі;

\oplus – знак додавання за модулем 2.

2.3 Модулятор сигналу ФМ-2 повинен поставити у відповідність вхідній послідовності символів 1 і 0 послідовність елементарних сигналів (2) відповідно до маніпуляційного коду: $1 \rightarrow s_1(t)$, $0 \rightarrow s_0(t)$. Зазначене формування сигналу ФМ-2 може бути забезпечено схемою, наведеною на рис. 2, в якій використані логічні схеми. Тут G – генератор несінного колювання, що виробляє меандр частоти f_0 . Суматор за модулем 2 забезпечує отримання на його виході меандра з фазою π , коли на вході $b(t)$ символ 1, та меандра з фазою 0, коли на вході $b(t)$ символ 0. Смуговий фільтр (СФ) формує спектр сигналу ФМ-2 навколо частоти f_0 . У схемі модулятора сигналу ФМ-2, що наведена на рис. 3, обмеження спектра здійснюється за низькою частотою. Ця схема містить тільки аналогові елементи, а сигнал $b(t)$ – двополярний.

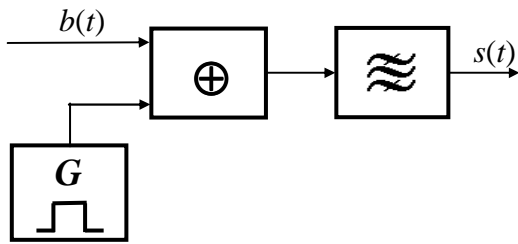


Рисунок 2 – Модулятор сигналу ФМ-2 на логічних схемах

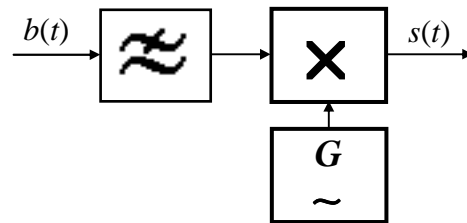


Рисунок 3 – Модулятор сигналу ФМ-2 на аналогових схемах

2.4 Демодулятор сигналу ВФМ-2 може бути виконаний методом когерентного приймання (порівняння полярностей) або методом некогерентного приймання (порівняння фаз). Тут розглядається когерентний демодулятор сигналу ВФМ-2 (рис. 4). За сигналом $z(t)$ (адитивна суміш переданого сигналу (1) і завади) відновлюються відносно кодовані символи $\hat{b}_k^{\text{відн}}$

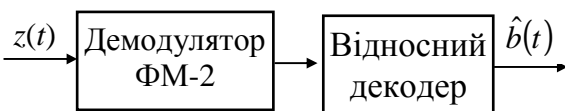


Рисунок 4 – Структурна схема когерентного демодулятора сигналу ВФМ-2

Відносний декодер відновлює передані символи за правилом

Відносний декодер відновлює передані символи за правилом

$$\hat{b}_k = \hat{b}_k^{\text{відн}} \oplus \hat{b}_{k-1}^{\text{відн}}. \quad (4)$$

2.5 У демодуляторі сигналу ФМ-2 (рис. 5) виконується поелементне оброблення сигналу $z(t)$. Смуговий фільтр (СФ) виконує додетекторне оброблення сигналу – фільтрацію по радіочастоті з метою ослаблення завади на вході перемножувача. Перемножувач разом з фільтром нижніх частот (ФНЧ) здійснюють когерентне (синхронне) детектування сигналу. ФНЧ виконує післядетекторне оброблення сигналу. СФ і ФНЧ разом утворюють фільтр, узгоджений (чи близький до узгодженого) з елементарними сигналами.

2.6 Для роботи когерентного детектора необхідна схема відновлення несінного колювання (ВН). Схеми ВН демодуляторів ФМ-2 будують на основі одного з методів:

1) подвоєння частоти модульованого сигналу, щоб зняти модуляцію, фільтрація подвоєної частоти несінної за допомогою схеми ФАПЧ, ділення частоти профільтрованого колювання на 2;

2) обчислення похибки фази місцевого генератора несінної за алгоритмом Костаса, настроювання частоти цього генератора за схемою ФАПЧ.

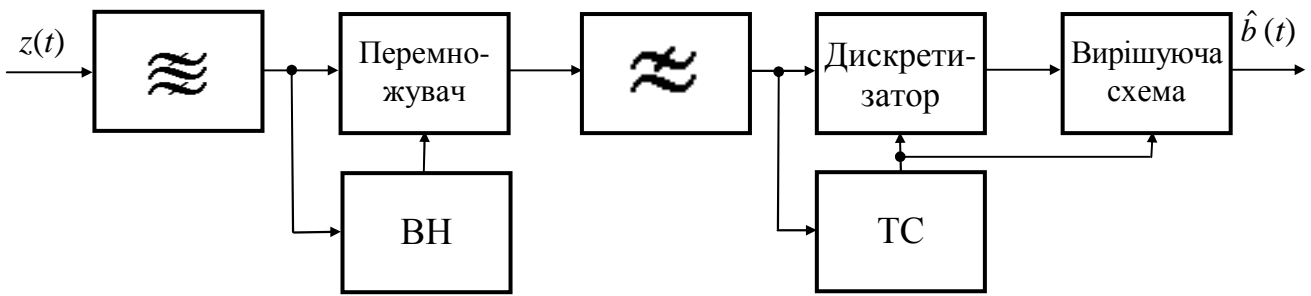


Рисунок 5 – Схема демодулятора сигналу ФМ-2

Основними характеристиками схеми ВН, як і будь-якої системи ФАПЧ, є смуга захоплення, смуга утримання і шумова смуга.

2.7 У дискретизаторі після ФНЧ беруться відліки у моменти, коли миттєві значення корисного сигналу максимальні (за модулем). Дискретизатор управляється від схеми тактової синхронізації (ТС), яка формує відлікові імпульси з тактовою частотою $f_T = 1/T$. Частота f_T відсутня в спектрі сигналу на вході ТС. Одним з методів нелінійного перетворення цього сигналу, за якого отримують сигнал, у спектрі якого міститься коливання частоти f_T , є виділення фронтів: при зміні полярності сигналу на вході ТС формується П-імпульс тривалості порядку $T/2$. Основна частота такої імпульсної послідовності дорівнює f_T . Ця імпульсна послідовність використовується як еталонне коливання для схеми ФАПЧ. Відлікові імпульси формуються з коливання настроюваного генератора схеми ФАПЧ. Основними характеристиками схеми ТС, як і будь-якої системи ФАПЧ, є смуга захоплення, смуга утримання і шумова смуга.

Вирішуюча схема виносить рішення по полярності відліку на її вході. Вона видає рішення символами 1 і 0.

2.8 Основною характеристикою модема є його завадостійкість, яка описується залежністю ймовірності помилки символу на виході демодулятора p від відношення сигнал/шум на його вході. Для порівняння різних способів передавання зручно як відношення сигнал/шум використовувати E_b/N_0 – відношення енергії сигналу на біт до питомої потужності шуму на вході демодулятора, і характеристикою завадостійкості є залежність

$$p = f(E_b/N_0). \quad (5)$$

Для будь-якого методу модуляції і способу приймання можна розрахувати потенційну завадостійкість використовуваних елементарних сигналів. Вона реалізується оптимальним демодулятором. Для сигналу ВФМ-2 потенційна завадостійкість визначається

$$p_{\text{ВФМ-2}}^{\text{опт}} = 2p_{\text{ФМ-2}}^{\text{опт}} = 2V(\sqrt{2E_b/N_0}), \quad (6)$$

де $p_{\text{ФМ-2}}^{\text{опт}}$ – ймовірність помилки при оптимальному прийманні сигналу ФМ-2;

$$V(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} \exp(-t^2/2) dt \quad \text{– одна з форм інтеграла ймовірності.}$$

Формула (5) вірна, коли $p_{\text{ФМ-2}}^{\text{опт}} \ll 1$.

Завадостійкість реального модему нижча, ніж оптимального демодулятора, із-за неточностей формування й оброблення сигналів, помилок фаз відновлених несівного і тактового коливань. Після визначення завадостійкості реального модему $p = f(E_b/N_0)$ розраховують величину енергетичних втрат (ЕВ) демодуляції. ЕВ показують у скільки разів (на скільки децибел) необхідно збільшити відношення сигнал/шум на вході реального демодулятора порівняно з відношенням сигнал/шум на вході оптимального демодулятора, щоб мати ту ж саму задану ймовірність помилки.

3 Ключові питання

- 3.1 У чому полягає метод передавання ВФМ-2?
- 3.2 Пояснити правила відносного кодування і декодування.
- 3.3 Що таке “інверсна робота” під час демодуляції сигналів ФМ-2?
- 3.3 Пояснити способи формування сигналу ФМ-2 логічними й аналоговими схемами.
- 3.4 Пояснити принцип когерентної демодуляції сигналу ВФМ-2.
- 3.5 Зобразити та пояснити структурну схему демодулятора сигналу ФМ-2.
- 3.6 Пояснити принципи відновлення несівної в демодуляторі сигналу ФМ-2.
- 3.7 Пояснити принцип побудови схеми тактової синхронізації демодулятора сигналу ФМ-2.
- 3.8 Як розрахувати завадостійкість оптимального когерентного демодулятора сигналу ВФМ-2?
- 3.9 Що таке енергетичні втрати демодуляції?

4 Домашнє завдання

- 4.1 Вивчити розділ “Модеми сигналів цифрової модуляції” за конспектом лекцій і літературою [1, с. 80...110].
- 4.2 Закодувати відносним кодом ПВП довжиною 15 (один період послідовності (8)).
- 4.3 Розрахувати залежність імовірності помилки від відношення сигнал/шум при оптимальному прийманні сигналу ВФМ-2 для діапазону значень $E_b/N_0 = 4 \dots 10$ дБ. Під час розрахунків можна використовувати наближену формулу $V(z) = 0,65 \exp(-0,44(z + 0,75)^2)$. Побудувати графік розрахованої залежності, використовуючи поле однієї сторінки робочого зошита (приклад побудови дивись у вказівках до виконання лабораторної роботи 7).
- 4.4 Підготуватись до обговорення за ключовими питаннями.

5 Лабораторне завдання

- 5.1 *Увімкнути модем і вимірювальні прилади. Ознайомитись зі схемою модема.* Спостерігаючи ПВП на вході модулятора і виході демодулятора, переконатись, що модем у робочому стані.
- 5.2 *Дослідити роботу відносного кодера і декодера.* Занести до протоколу тестову послідовність з періодом 15, результати її відносного кодування і декодування. Порівняти отримані дані з результатами розрахунку в домашньому

завданні. Вивчити і занести до протоколу роботу відносного кодера, коли до його входу подається послідовність нулів, а потім послідовність одиниць.

5.3 Вивчити і занести до протоколу часову і спектральну діаграми сигналу на виході модулятора ВФМ-2 (модуляція ПВП з періодом 15).

5.4 Вивчити і занести до протоколу часові діаграми процесів в усіх контрольних точках демодулятора при передаванні тестової ПВП.

5.5 Виміряти смуги захоплення і смуги утримання схеми відновлення несівної. Наявність синхронізму контролюється шляхом порівняння часових діаграм на інформаційному вході модулятора і на виході синхронного детектора. Частоти захоплення й утримання визначаються за допомогою частотоміра ЧЗ-63. Слід мати на увазі, що від генератора подається коливання з частотою 12 МГц, а в модуляторі після ділення частоти на 2 отримують несівне коливання частоти 6 МГц. За результатами вимірів установити частоту несівної в центрі смуги синхронізму.

5.6 Виміряти смуги захоплення і смуги утримання схеми тактової синхронізації. Наявність синхронізму контролюється по збігу часових діаграм на вході відносного кодера і на виході відносного декодера. Тактова частота модулятора встановлюється настроюванням генератора ГЗ-111 і визначається за допомогою частотоміра ЧЗ-63. За даними вимірів установити тактову частоту в центрі смуги синхронізму.

5.7 Виміряти залежність імовірності помилки на виході демодулятора від відношення сигнал/шум на його вході. Для установки відношення сигнал/шум використати вольтметр ВЗ-48, підімкнений до виходу смугового фільтра демодулятора. Установка відношення сигнал/шум проводиться в наступному порядку. Вимкнути шум у генераторі Г2-37 і виміряти рівень сигналу. Потім вимкнути несівне коливання в генераторі Г4-18, увімкнути шум, при ослабленні атенюатора 0 дБ регулюванням генератора Г2-37 установити рівень шуму такий же, як і рівень сигналу. Після такої установки відношення середніх потужностей сигналу і шуму $P_s/P_n = 1$ (0 дБ). Подальша установка відношення сигнал/шум виконується шляхом уведення ослаблення в атенюаторі: відношення P_s/P_n буде дорівнювати ослабленню, уведеному в атенюаторі. Відношення $\frac{E_6}{N_0} = \frac{P_s T_6}{P_n / F_{ш}} = \frac{P_s}{P_n} \cdot \frac{F_{ш}}{R}$, де R – швидкість цифрового сигналу, яка визначена в

п. 5.6; $F_{ш} = 1000$ кГц – шумова смуга завади від Г2-37. Кількість помилок $N_{пом}$ підраховується частотоміром ЧЗ-63, підімкненим до виходу схеми виявлення помилок. Час підрахунку частотоміра T_p установлюється таким, що дорівнює 10 с. Імовірність помилки підраховується $p = N_{пом}/N$; $N = T_p/T = T_p R$.

Побудувати отриману залежність на рисунку, підготовленому в домашньому завданні. Порівняти отриману залежність з кривою для оптимального демодулятора – визначити енергетичні втрати модема на рівні ймовірності помилки 10^{-4} .

6 Опис лабораторної установки

Структурна схема лабораторної установки наведена на рис. 6. Використані модулятор і демодулятор ВФМ-2, які застосовувались як каналостворююче обладнання в системі супутникового зв'язку "Група". До установки входить наступне устаткування.

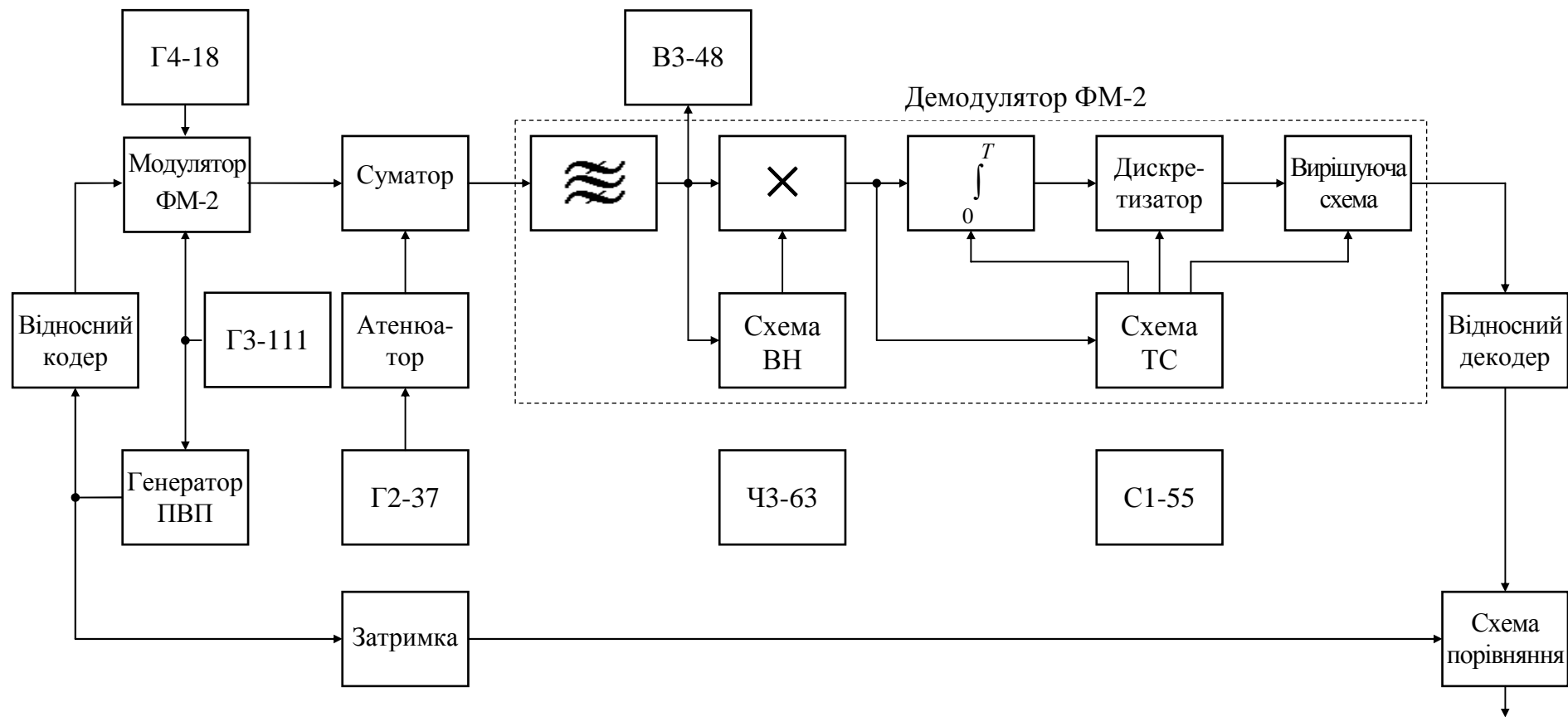


Рисунок 6 – Структурна схема лабораторної установки

Модулятор сигналу ВФМ-2 формує сигнал на несівній частоті 6 МГц при швидкості передавання 512 кбіт/с. Модулятор виконаний за схемою, наведеною на рис. 2. Від зовнішнього генератора Г4-18 подається гармонічне коливання частоти 12 МГц, діленням частоти на 2 логічними схемами формується меандр частоти 6 МГц для модулятора. У системі “Група” смуга одного каналу зв’язку становила 1,35 МГц. Тому розробники цього модема не ставили задачу формування компактного спектра і смугу пропускання смугового фільтра вибрали порядку 1 МГц.

Для випробувань модема необхідне джерело двійкового повідомлення, яке б відповідало моделі більшості реальних повідомлень, – це послідовність двійкових рівноймовірних незалежних символів 1 і 0. У такому разі ймовірність появи будь-якого блока з n символів A_n у послідовності достатньо великої довжини визначається виразом

$$P(A_n) = 1/2^n. \quad (7)$$

Існують методи генерування двійкових послідовностей, в яких властивість (7) виконується для $n \leq n_{\max}$. Значення n_{\max} пов’язано з довжиною послідовності $L = 2^{n_{\max}} - 1$. Такі послідовності називаються псевдовипадковими (ПВП), тому що послідовності детерміновані, але виконується співвідношення (7), властиве випадковим послідовностям. Наприклад, для $n_{\max} = 4$ ($L = 15$) ПВП має вигляд

$$111100010011010 | 11110001... \quad (8)$$

└_ ПВП $L = 15$ _┘ └_ Повторення ПВП

Шляхом повторень ПВП одержують послідовності великої довжини. Така ПВП використовується в лабораторній установці. Оскільки сигнал ПВП періодичний з періодом LT (T – тривалість П-імпульсу), то його спектр дискретний з кроком $1/LT$, тобто, основна частота $f_1 = 1/(LT)$, а вищі гармоніки мають частоти nf_1 , $n=2, 3, \dots$ (рис. 7). Обвідна складових відповідає амплітудному спектру П-імпульсу тривалістю T .

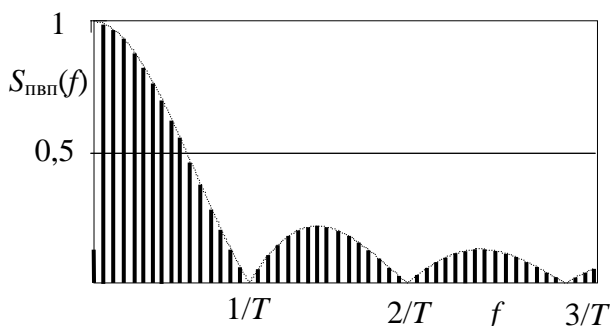


Рисунок 7 – Амплітудний спектр ПВП з періодом 15

Тактову частоту порядку 512 кГц задає зовнішній генератор Г3-111. Від нього коливання типу меандр подається на генератор ПВП і модулятор.

Демодулятор забезпечує демодуляцію сигналу ВФМ-2 на несівній частоті 6 МГц при швидкості передавання 512 кбіт/с і складається з демодулятора сигналу ФМ-2 і відносного кодера. Демодулятор сигналу ФМ-2 містить смуговий фільтр, схему відновлення несів-

ного коливання (ВН), когерентний детектор (перемножувач), схему тактової синхронізації (ТС), інтегратор зі скиданням, дискретизатор і вирішуючу схему. Оскільки в модуляторі сигнал “слабо” обмежений за спектром, то як узгоджений фільтр використовується інтегратор зі скиданням. Скидання виконується після того, як взято відлік з виходу інтегратора. Вирішуюча схема виносить рі-

шення за полярністю відліку. Схема ВН виконана на основі системи ФАПЧ з подвоєнням частоти модульованого сигналу. Схема ТС виконана на основі системи ФАПЧ, а еталонне колювання формується схемою виділення фронтів.

Суматор сигналу і шуму моделює канал зв'язку. Шум надходить від зовнішнього генератора Г2-37 через атенюатор, який дозволяє уводити ослаблення від 0 до 15 дБ із кроком 1 дБ.

Для виявлення помилок, що виникають під час демодуляції, використовується схема порівняння прийнятої послідовності з переданою. Для збігу за часом цих послідовностей у колі переданої (взірцевої) послідовності увімкнено схему затримки на час проходження сигналу через модем.

Крім згаданих вище вимірювальних приладів, до складу установки входять

- двопробеневий осцилограф С1-55 для спостереження часових діаграм;
- аналізатор спектра СК4-59 для дослідження спектра сигналу на виході фільтра модулятора;
- квадратичний вольтметр В3-48 для установлення відношення сигнал/шум;
- частотомір ЧЗ-63 для виміру частоти несівної, тактової частоти і підрахунку кількості помилок у прийнятій послідовності.

7 Вимоги до звіту

7.1 **Назва** лабораторної роботи.

7.2 **Мета** роботи.

7.3 **Результати** виконання домашнього завдання.

7.4 **Структурна схема** досліджень та **результати** виконання пп. 5.2...5.7 лабораторного завдання (часові діаграми, числові значення, графіки і пояснення до них).

7.5 **Висновки** до п. 5.7 завдання та до роботи в цілому.

7.6 Дата, підпис студента, віза викладача з оцінкою за 100-бальною шкалою.

Література

1. **Банкет В.Л., Дорофеев В.М.** Цифровые методы в спутниковой связи. – М.: Радио и связь, 1988. – 240 с.

Лабораторна робота 2

ВИВЧЕННЯ ТА ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЛЬНОГО ТРАКТУ СТАНЦІЇ “АЙСБЕРГ”

1. Мета роботи

1.1 Вивчення основних характеристик приймально-передавального тракту земної станції (ЗС) супутникового зв'язку “Айсберг”.

1.2 Вимірювання основних характеристик приймального тракту станції.

2 Ключові положення

2.1 **Передавальний тракт станції.** При побудові передавальних трактів ЗС супутникового зв'язку реалізують ряд загальних принципів:

– модуляція частотна (ЧМ) для телефонії або двійкова відносна фазова (ВФМ-2) (для передавання даних) виконується на проміжній частоті (звичайно 20, 70 або 140 МГц), потім спектр модульованого сигналу переноситься в діапазон робочих частот супутникового каналу дво- або трикратним перетворенням частоти;

– у більшості ЗС у блоках гетеродинів використовується система ФАПЧ, опорне коливання для якої забезпечується від високостабільного термостатованого кварцового генератора.

Структурна схема передавального тракту станції зображена на рис. 1.

Передавач станції може працювати в режимі передавання телефонії (ТЛФ) або передавання даних (ПД). Модулюючий сигнал ТЛФ або ПД надходить на модулятор, куди також подається коливання першої піднесівної частоти з першого гетеродина $f_{Г1}$. Сигнал першої проміжної частоти (ПЧ) $f_{ПЧ1} = f_{Г1}$ надходить до блока перетворення частоти. Тут відбувається двократне перетворення частоти з використанням частот $f_{Г2}$ і $f_{Г3}$ і формується спочатку сигнал частоти $f_{ПЧ2} = f_{ПЧ1} + f_{Г2}$, а потім частоти $f_{ПЧ3} = f_{ПЧ2} + f_{Г3} = f_{ПЧ1} + f_{Г2} + f_{Г3}$. Цей сигнал надходить до антенного блока, де після підсилення відбувається останнє перетворення частоти та формується сигнал на робочій частоті

$$f_{роб} = f_{ПЧ3} + f_{Г4} = f_{ПЧ1} + f_{Г2} + f_{Г3} + f_{Г4}. \quad (1)$$

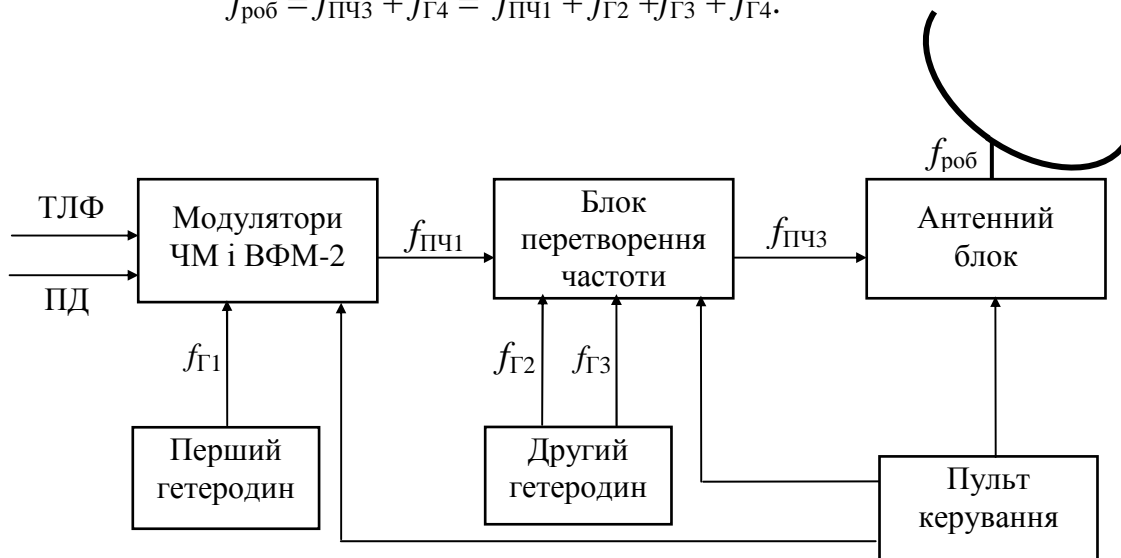


Рисунок 1 – Узагальнена структурна схема передавального тракту станції “Айсберг”

Значення частот гетеродинів і ПЧ передавального тракту станції такі:

$$\left. \begin{aligned} f_{Г1} &= f_{ПЧ1} = 20 \text{ МГц}; \\ f_{Г2} &= 93 \text{ МГц}; \quad f_{ПЧ2} = 20 + 93 = 113 \text{ МГц}; \\ f_{Г3} &= (63,5 \dots 72) \text{ МГц}; \quad f_{ПЧ3} = (176,5 \dots 185) \text{ МГц}; \\ f_{Г4} &= 1460 \text{ МГц}; \quad f_{роб} = (1636,5 \dots 1645) \text{ МГц}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Частота $f_{Г3}$ установлюється в діапазоні (63,5...72) МГц з кроком 25 кГц залежно від необхідної робочої частоти. Синхронізація коливань гетеродинів, побудованих за принципом ФАПЧ, здійснюється високостабільним коливанням частоти 5 МГц.

Модулятори ЧМ і ВФМ-2 формують сигнали на частоті 20 МГц. Девіація частоти ЧМ сигналу при смузі частот модулюючого сигналу (300 – 3000) Гц становить $(12 \pm 1,3)$ кГц. Зсув фази сигналу ВФМ-2 $\Delta\varphi = \pm 90^\circ$. Швидкість цифрового сигналу при ВФМ-2 $(4800 \pm 0,5)$ біт/с.

2.2 Приймальний тракт станції. Приймач станції може працювати в режимах приймання сигналу телефонії (ТЛФ) або даних. Структурна схема приймального тракту наведена на рис. 2.

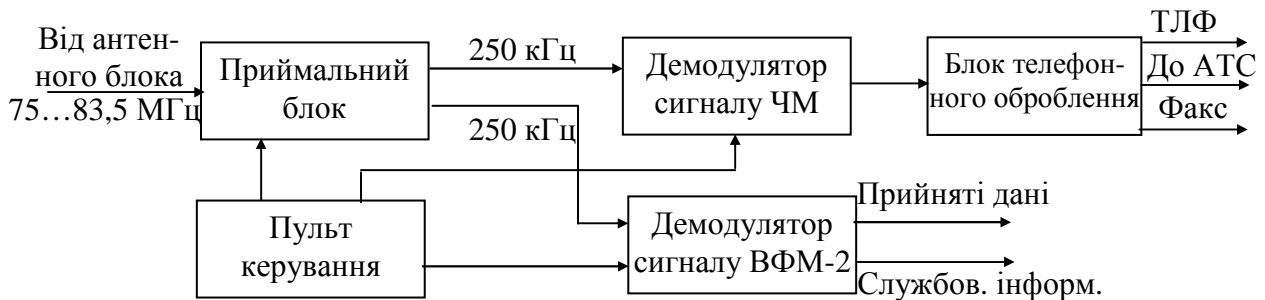


Рисунок 2 – Структурна схема приймального тракту станції

У приймальному блоці (ПРМ) виконується двократне перетворення частоти вхідного сигналу. З виходу ПРМ сигнал із частотою 250 кГц надходить до демодулятора сигналу ЧМ у режимі ТЛФ або до демодулятора сигналу ВФМ-2 у режимі ПД.

Сигнал з демодулятора сигналу ЧМ подається на блок телефонного оброблення (БТО), де відбувається його експандування. БТО має три виходи: телефонне повідомлення, лінія до АТС, факсповідомлення.

2.3 Приймальний блок (ПРМ), функціональна схема якого зображена на рис. 3, призначений для підсилення та перетворення сигналу від антенного блока у сигнали ПЧ 250 кГц, попередня фільтрація сигналів ЧМ і ВФМ-2 і забезпечення селективності по паразитних каналах приймання. Діапазон частот сигналів на вході ПРМ f_c від 75,0 до 83,5 МГц.

До складу ПРМ входять:

- підсилювач вхідного сигналу;
- приймальний тракт сигналу ЧМ;
- приймальний тракт сигналу ВФМ-2;
- синтезатор частот у діапазоні 56,5...65,0 МГц із кроком 25 кГц;
- гетеродин частоти 18,25 МГц.

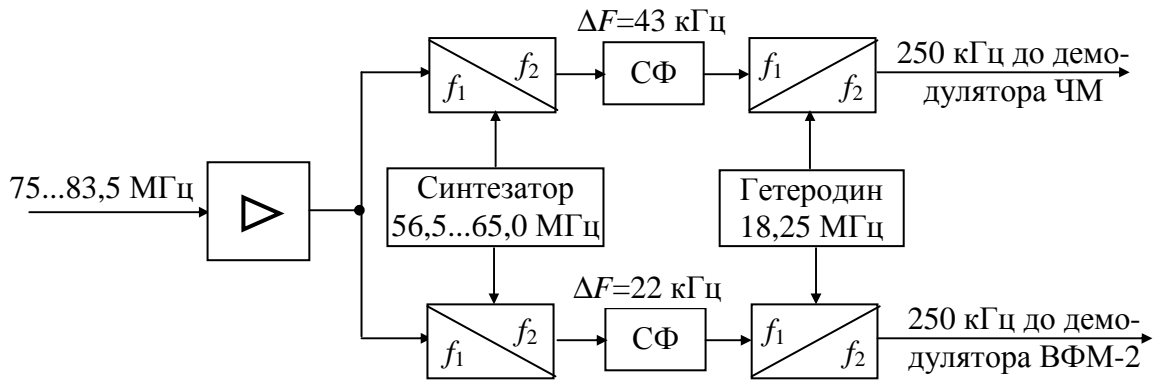


Рисунок 3 – Функціональна схема приймального блока

До складу тракту сигналу ВФМ-2 входять: два змішувача для отримання проміжних частот і фільтр першої ПЧ. На виході першого змішувача утворюється сигнал першої ПЧ із частотою $f_{ПЧ} = f_c - f_{синт} = 18,5$ МГц. Смоговий кварцовий фільтр (СФ) виділяє сигнал на частоті першої ПЧ, формує смугу пропускання тракту сигналу ВФМ-2, забезпечує селективність по сусідньому та дзеркальному каналах другої ПЧ. Його смуга пропускання 22 кГц.

На виході другого змішувача утворюється сигнал другої ПЧ

$$f_{ПЧ2} = f_{ПЧ1} - f_{гет} = 18,5 - 18,25 = 0,25 \text{ МГц.}$$

Сигнал виділяється фільтром нижніх частот, оскільки інші продукти перетворення знаходяться значно вище частоти зрізу ФНЧ.

Побудова тракту сигналу ЧМ ПРМ повністю ідентична побудові тракту сигналу ВФМ-2, описаному вище. Відмінність – смуга пропускання СФ 45 кГц.

2.4 Демодулятор сигналу ВФМ-2 виконаний за структурною схемою, наведеною на рис. 4. Він розрахований на приймання цифрового сигналу зі швидкістю $(1200 \pm 0,5)$ біт/с. До складу демодулятора входять:

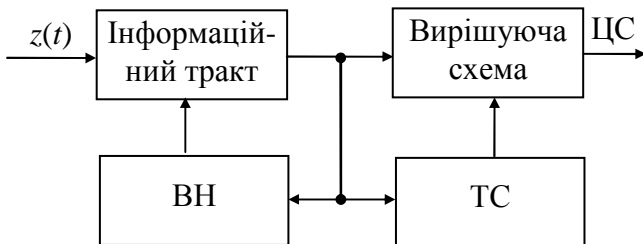


Рисунок 4 – Структурна схема демодулятора сигналу ВФМ-2

– інформаційний тракт, який містить смуговий фільтр, фазовий детектор і ФНЧ;

– схема відновлення несівної (ВН), яка виконана за схемою Костаса. Схема містить: детектор помилки, ФНЧ і генератор, керований напру-

гою. Постійна часу ФНЧ комутується – вона різна в режимі входження в синхронізм і в режимі синхронізму;

– схема тактової синхронізації (ТС), яка побудована за фільтровим методом – смуговий фільтр має смугу пропускання 20 Гц, граничні частоти (1200 ± 10) Гц;

– вирішуюча схема виносить рішення за полярністю сигналу в момент, коли миттєве значення корисного сигналу на її вході максимальне.

2.5 Демодулятор сигналу ЧМ-2 виконаний за функціональною схемою, наведеною на рис. 5. До його складу входять:

- смуговий фільтр додетекторного оброблення сигналу;
- синхронно-фазовий детектор на основі петлі ФАПЧ;
- фільтр нижніх частот післядетекторного оброблення сигналу;
- схема шумоподавлення.

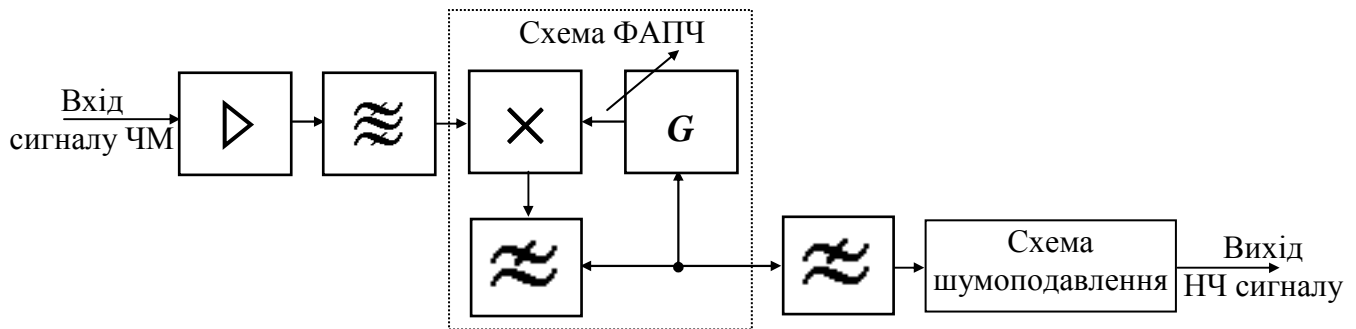


Рисунок 5 – Функціональна схема демодулятора сигналу ЧМ

Схема шумоподавлення вмикається в тому випадку, коли відношення сигнал/шум падає нижче порогового.

3 Ключові питання

3.1 Накреслити структурну схему передавального тракту станції, пояснити призначення блоків.

3.2 Накреслити структурну схему приймального тракту станції та функціональну схему приймального блоку, пояснити призначення блоків.

3.3 Накреслити структурну схему демодулятора ВФМ-2, пояснити призначення блоків.

3.4 Накреслити функціональну схему демодулятора ЧМ, пояснити призначення блоків.

3.5 В яких блоках приймального тракту забезпечується селективність по дзеркальному каналу першої ПЧ, другої ПЧ, по сусідньому каналу?

4 Домашнє завдання

4.1 Вивчити матеріал, викладений у розд. 2 і 6.

4.2 Підготувати відповіді на ключові питання.

4.3 Зобразити структурну схему приймального тракту станції та функціональну схему приймального блоку.

5 Лабораторне завдання

5.1 *Упевнитись у працездатності ПРМ.* Для цього до його входу слід подати від генератора гармонічного коливання напругу з частотою 75,0...83,5 МГц (узгоджується з викладачем) і перевірити наявність коливання з частотою 250 кГц на виходах до демодуляторів сигналів ЧМ і ВФМ-2.

5.2 *Провести вимірювання АЧХ трактів сигналів ВФМ-2 і ЧМ.* Для цього до входу ПРМ слід подати від генератора гармонічного коливання напругу з частотою, визначеною у п. 5.1. Вимірюється АЧХ по точках за допомогою мілівольметра та частотоміра, які підмикаються до відповідних виходів ПРМ. За результатами вимірювань будується графік АЧХ. Якщо є можливість викорис-

тати аналізатор спектра, то установити діапазон його вихідних частот, що охоплює визначену вище частоту.

5.3 *Виміряти селективність ПРМ по сусідньому каналу* в трактах сигналів ЧМ і ВФМ-2, вважаючи, що розстроєння сусіднього каналу дорівнює ± 50 кГц¹.

5.4 *Виміряти селективність ПРМ по дзеркальних каналах* першої ПЧ $f_{ПЧ1} = 18,5$ МГц і другої ПЧ $f_{ПЧ2} = 250$ кГц, вважаючи, що приймається сигнал з частотою, знайденою в п. 5.1¹.

6 Короткий опис досліджуваних блоків станції

Якщо центральний процесор і система керування станцією працюють, то станція після ввімкнення живлення знаходиться в режимі чергового приймання на частоті 77,5 МГц. Тому працездатність ПРМ можна перевірити на цій частоті за наявності сигналу частоти $f_{ПЧ2} = 250$ кГц на виходах до демодуляторів сигналів ЧМ і ВФМ-2. Якщо система управління станцією не працює, то робочу частоту необхідно визначати шляхом перестроювання за частотою вхідного колювання в межах робочого діапазону $f_c = 75,0 \dots 83,5$ МГц до появи на виходах напруги з частотою $f_{ПЧ2} = 250$ кГц.

АЧХ СФ, які увімкнено в коло першої ПЧ $f_{ПЧ1}$, можна виміряти в тракті другої ПЧ $f_{ПЧ2}$, тому що кола $f_{ПЧ1}$ зовні недоступні.

У блоці ПРМ використовується двократне перетворення частоти, причому обидва верхні, тобто частота сигналу більша за частоту гетеродина. До входу ПРМ сигнал з частотою f_c у діапазоні 75,0 ... 83,5 МГц надходить з антенного блока, частота гетеродина знаходиться в межах $f_r = 56,5 \dots 65,0$ МГц. Виходячи зі сказаного, частота першого дзеркального каналу буде визначатись

$$f_{зк1} = f_c - 2f_{ПЧ1} = f_c - 2 \cdot 18,5 = f_c - 37 \text{ МГц.}$$

Настроювання на частоту дзеркального каналу слід проводити ретельно шляхом перестроювання $f_{зк1}$ поблизу обчисленого значення і домагаючись максимуму показань вольтметра, підімкненого до виходу ПРМ.

Для тракту другої ПЧ частота сигналу дорівнює частоті $f_{ПЧ1} = 18,5$ МГц, частота гетеродина $f_r = 18,25$ МГц, а друга ПЧ $f_{ПЧ2} = 250$ кГц. Тоді частота другого дзеркального каналу

$$f_{зк2} = f_{ПЧ1} - 2f_{ПЧ2} = 18500 - 2 \cdot 250 = 18000 \text{ кГц.}$$

7 Вимоги до звіту

7.1 **Назва** лабораторної роботи.

7.2 **Мета** роботи.

7.3 **Результати** виконання домашнього завдання.

7.4 До **протоколу** виконання лабораторної роботи заносяться:

– структурні схеми вимірювань;

¹ Селективність визначається як відношення коефіцієнта підсилення на частоті корисного сигналу до коефіцієнта підсилення на частоті заважаючого сигналу. Показово подавати селективність у децибелах, яка розраховується як 20 логарифмів знайденого відношення.

- список використаних приладів з їхніми характеристиками;
- таблиці і графіки результатів вимірювань за кожним з пунктів завдання.

7.5 **Висновки** за кожним пунктом виконаного лабораторного завдання.

7.6 Дата, підпис студента, віза викладача з оцінкою за 100-бальною шкалою.

Література

1 **Спутниковая связь и вещание: Справочник**; Под ред. Л. Я. Кантора. – М.: Радио и связь, 1997. – 528 с.

Лабораторна робота 3

ВИВЧЕННЯ ТРАКТУ ПЧ І ДЕМОДУЛЯТОРА ПРИЙМАЧА ППСТ-78 І ВИМІРЮВАННЯ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК

1 Мета роботи

1.1 Вивчення методів оброблення телевізійних сигналів у приймачі ППСТ-78.

1.2 Вимірювання основних характеристик тракту проміжної частоти (ПЧ) і демодулятора приймача ППСТ-78.

2 Ключові положення

2.1 Призначення приймача ППСТ-78. Приймач призначений для приймання сигналів, модульованих сигналами телебачення (відео, кольоровості, піднесівних звукового супроводу) і радіомовлення; розділення цих сигналів; демодулювання і подачі їх на потужний телевізійний передавач ретранслятора.

Структурна схема приймача типова і містить:

- тракт радіочастоти;
- тракт ПЧ;
- тракт демодулятора відеосигналу;
- тракт звукового супроводу телебачення (ТБ);
- тракт демодулятора радіомовлення.

Номінальне значення частоти приймання – 714 МГц, ПЧ – 70 МГц.

Модуляція частотна з девіацією частоти телевізійним (ТВ) сигналом 9 МГц.

Девіація частоти піднесівної звукового супроводу 2 МГц.

Частоти піднесівних звукового супроводу 6,5 МГц, радіомовлення 7 МГц.

2.2 Оброблення телевізійних сигналів у приймачі. У приймачі ППСТ-78 тракти ПЧ і демодулятора забезпечують оброблення телевізійного частотно-модульованого (ЧМ) сигналу і відеосигналу. Це оброблення побудовано за класичною схемою оброблення сигналів аналогових видів модуляції (рис. 1): $z(t)$ – адитивна суміш сигналу і завади; $\hat{b}(t)$ – оцінка первинного сигналу.



Рисунок 1 – Структурна схема оброблення сигналів у приймачі

У приймачі ППСТ-78 додетекторне оброблення телевізійного ЧМ сигналу здійснюється смуговим фільтром тракту ПЧ² із середньою частотою 70 МГц, післядетекторне оброблення відеосигналу – фільтром нижніх частот (ФНЧ). Детектор – стандартний частотний детектор (ЧД).

² Тракт ПЧ забезпечує також основне підсилення сигналу в приймачі й автоматичне регулювання підсилення (АРП), але з погляду оброблення сигналів ці функції є несуттєвими.

2.3 Додетекторне оброблення телевізійних сигналів з ЧМ. У діапазоні 0,7 ГГц Регламент радіозв'язку в інтересах сумісності з наземним мовленням допускає застосування в супутниковій службі тільки частотної модуляції [1].

Девіацію частоти в супутникових системах вибирають такою, щоб необхідне відношення сигнал/шум на виході приймача досягалося в області порогових відношень сигнал/шум на вході детектора. Однак через обмеженість смуги частот у системі “Екран” девіація обрана із трохи меншим значенням, що дорівнює 9 МГц, яке відповідає піковим значенням модулюючого сигналу (разом з синхроімпульсами). Смуга частот, займана ТВ сигналом

$$F_{\text{ЧМ}} = 2F_{\text{max}}(m_{\text{ЧМ}} + 1) = 2 \cdot 6(9/6 + 1) = 12 \cdot 2,5 = 30 \text{ МГц.} \quad (1)$$

Основою розроблення вимог до амплітудно-частотної (АЧХ) і фазочастотної (ФЧХ) характеристик лінійних трактів ЧМ сигналів є Рекомендації МККР на якість передавання первинних сигналів (звукових, телевізійних, телефонних, зображень газетних смуг тощо) і розрахункові співвідношення для обчислення лінійних і нелінійних спотворень [1]. Так, припустимі лінійні і нелінійні спотворення ТВ сигналів нормуються за Рек. 567 МККР, якісні показники сигналів звукового мовлення і звукового супроводу ТВ вибираються відповідно до Рек. J.21 МККТТ.

Виходячи з цих рекомендацій, країни, організації і оператори, що експлуатують супутникові системи зв'язку, складають відповідні стандарти на канали передавання телевізійних, звукових, телефонних й ін. сигналів. Для АЧХ і ФЧХ (чи групового часу затримки ГЧЗ) приймально-передавальних трактів розраховуються шаблони. Нижче наведений один з них, а саме, організації EUTELSAT [2]. Стандарт передбачає три смуги телевізійного сигналу: 25, 30 і 36 МГц. Шаблон для АЧХ і ГЧЗ систем ПАЛ і СЕКАМ наведений на рис. 2, а числові дані до нього – в табл. 1 і 2³.

Таблиця 1 – Шаблони для АЧХ телевізійного тракту з ЧМ

Смуга частот, МГц	A, МГц	B, МГц	C, МГц	D, МГц	a, дБ	b, дБ	c, дБ	d, дБ	e, дБ
25,0	18,0	22,5	25,75	34,0	0,3	2,5	8,0	25,0	0,2
30,0	24,0	30,0	35,00	50,0	0,5	2,5	7,0	25,0	0,3
36,0	28,8	36,0	45,25	60,0	0,6	2,5	10,0	25,0	0,3

Таблиця 2 – Шаблони для ГЧЗ телевізійного тракту з ЧМ

Смуга частот, МГц	A, МГц	H, МГц	f, нс	g, нс	h, нс
25,0	18,0	20,7	3,0	5,0	15,0
30,0	24,0	30,0	5,0	5,0	15,0
36,0	28,8	33,1	3,0	5,0	15,0

³ Хоча до складу приймально-передавального тракту входить багато селективних кіл, але наведені шаблони є шаблонами АЧХ і ГЧЗ тракту ПЧ, де здійснюється основне оброблення сигналів і забезпечується селективність по сусідньому каналу.

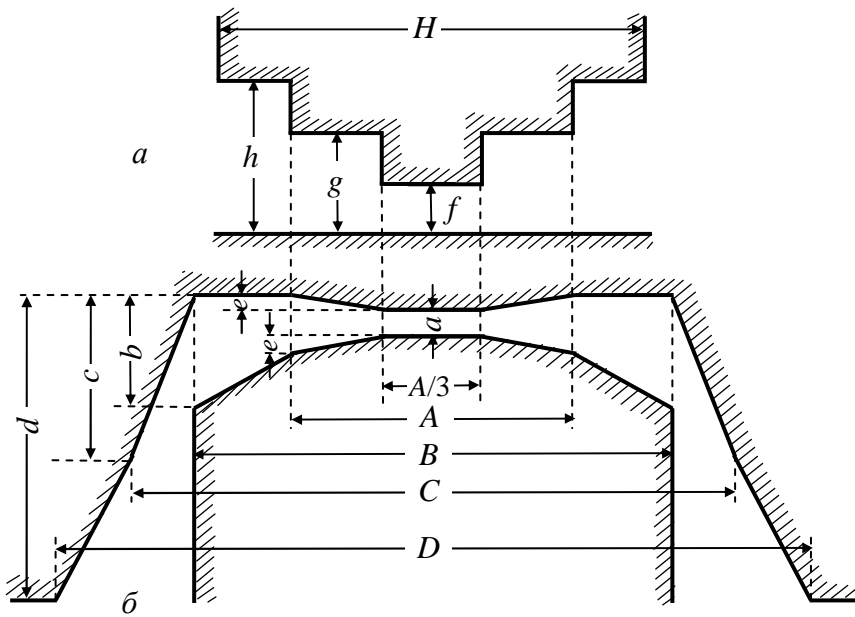


Рисунок 2 – Шаблони ГЧЗ і АЧХ телевізійного тракту з ЧМ

2.4 Дія сигналу і шуму на частотний детектор. Аналіз одночасної дії сигналу з амплітудою A_0 і флуктуаційного шуму зі спектральною густиною потужності N_0 на ЧД показує [1], що спектральна густина потужності шуму на виході ЧД описується параболічною залежністю (рис. 3)

$$G_1(f) = (2\pi f)^2 \frac{2N_0}{A_0^2}, \quad 0 \leq f \leq F_{\max}. \quad (2)$$

Така форма спектра шуму $G_1(f)$ на виході ЧД призводить до того, що верхні частоти первинного сигналу зазнають найбільшого впливу шумів. Тому в системах з ЧМ для підвищення завадостійкості приймання застосовують лінійні частотні передспотворення первинного сигналу на передавальній стороні і частотні відновлення на приймальній стороні. На рис. 4 зображені АЧХ контура частотних передспотворень $K_{\text{пер}}$ і АЧХ відновлюючого контуру $K_{\text{відн}}$. Як видно з рисунка, АЧХ відновлюючого контуру має форму, обернену по відношенню до АЧХ контуру передспотворень. На рис. 3 наведено графік спектральної густини потужності шуму на виході відновлюючого контура $G_{\text{відн}}(f)$. Цим забезпечується післядетекторне оброблення первинного сигналу в приймачі. Застосування таких контурів на передачі і прийомі призводить до того, що відновлюється первинний сигнал без лінійних спотворень, а вигравш демодулятора збільшується.

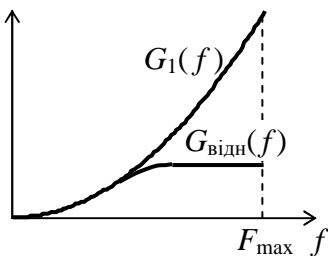


Рисунок 3 – Спектри шуму на виході ЧД та відновлюючого контуру

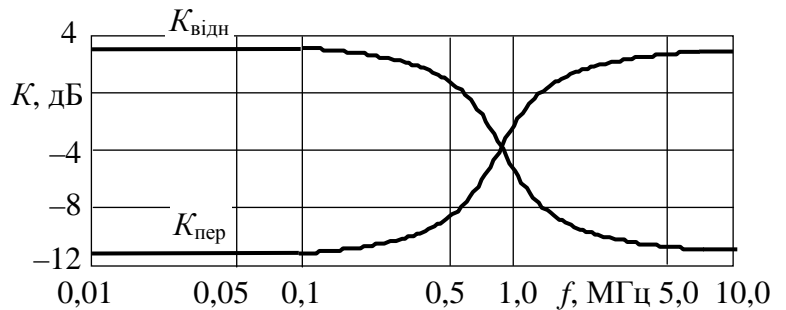


Рисунок 4 – АЧХ контурів частотних передспотворень і відновлення ТВ сигналу

3 Ключові питання

3.1 Перерахувати блоки, що входять до складу тракту ПЧ приймача ППСТ-78, та пояснити призначення кожного з них.

3.2 Яку селективність забезпечує тракт ПЧ? Які її норми?

3.3 З яких міркувань вибираються АЧХ і ФЧХ фільтрів оброблення телевізійних ЧМ сигналів?

3.4 Перерахувати блоки, що входять до складу тракту демодулятора приймача ППСТ-78, та пояснити призначення кожного з них.

3.5 З якою метою застосовуються передспотворення первинних сигналів при їхньому передаванні методом ЧМ?

4 Домашнє завдання

4.1 Навести структурну схему тракту ПЧ і демодулятора приймача ППСТ-78 і дати короткий опис призначення кожного з блоків.

4.2 Заготовити шаблон АЧХ тракту ПЧ для приймання ЧМ сигналів супутникового телевізійного мовлення для смуги частот 30 МГц.

5 Лабораторне завдання

5.1 Зібрати схему для дослідження тракту ПЧ і демодулятора приймача ППСТ-78. Для цього слід до входу блоку УПЧ 1Э (рознім “Вхід”) підімкнути високочастотний генератор гармонічних коливань, що має діапазон 50–100 МГц (наприклад, типу Г4-116), до виходу блоку ФК 2Э (рознім “Вихід”) – високочастотний мілівольтметр (наприклад, типу В3-52/1), до виходу ФНЧ (рознім “Вихід”) блоку ЧД – вольтметр постійної напруги (наприклад, типу ВК 7-9). Схему для дослідження і застосовані прилади з їх параметрами занести до протоколу.

Примітки.

1. Номінальна напруга на вході УПЧ 1Э близько 5 мВ.
2. Для вимірів рівня сигналів на виходах трактів ПЧ і ЧД можна скористатися вмонтованим приладом контролю, але точність вимірів при цьому буде низька.
2. Номінальна напруга на виході ФК 2Э – близько 300 мВ.
3. Максимальна напруга на виході ЧД – близько 1 В.

5.2 Провести вимірювання АЧХ тракту ПЧ. Вимірювання проводяться в діапазоні частот (70 ± 15) МГц (10–15 точок)⁴. Значення частот та напруги занести в табл. 3. Розрахувати нормовану АЧХ, А, дБ.

$$A = 20 \lg \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вих } 70}}, \quad (3)$$

де $U_{\text{вих } 70}$ – вихідна напруга на частоті 70 МГц.

Таблиця 3 – АЧХ тракту ПЧ

f , МГц						70					
$U_{\text{вих}}$, мВ											
А, дБ											

⁴ Вимірювання проводяться при установці ручного регулювання підсилення у блоці контролю (кнопка РР).

Розраховані нормовані значення АЧХ А, дБ нанести на заготовлений шаблон АЧХ.

5.3 Провести вимірювання селективності тракту ПЧ по сусідньому каналу. Для цього необхідно установити частоту коливання від генератора, що відповідає розстроюванню по частоті $\Delta f_{\text{ск}} = \pm 25$ МГц відносно $f_{\text{ПЧ}} = 70$ МГц, і визначити зменшення напруги на цих частотах, дБ, порівняно з вихідною напругою на частоті 70 МГц. Одним з методів вимірювання селективності по сусідньому каналу є збільшення рівня від генератора при розстроюванні (70 ± 25) МГц доти, поки не буде досягнуте те ж значення напруги на виході ПЧ, що і на частоті 70 МГц. Збільшення напруги від генератора, у дБ, і визначає селективність по сусідньому каналу.

5.4 Провести вимірювання детекторної характеристики ЧД. Для цього, як і в завданні 5.2, необхідно змінювати частоту генератора в межах (70 ± 15) МГц і показання вольтметра на виході ЧД (рознім “Вихід”) занести в таблицю, аналогічну табл. 3. За даними вимірів побудувати детекторну характеристику і визначити діапазон її лінійності.

6 Короткий опис блоків тракту ПЧ і демодулятора

6.1 Тракт проміжної частоти (рис. 5) призначений для додетекторного оброблення та підсилення ЧМ телевізійного сигналу на проміжній частоті 70 МГц, забезпечення селективності по сусідньому каналу (70 ± 25) МГц. Це здійснюється двома фільтрами зосередженої селекції (ФЗС1 і ФЗС2), корекції ГЧЗ фазовими коректорами (Кор 1 і Кор 2) і нерівномірності АЧХ амплітудними коректорами в блоках ФК 1Э і ФК 2Э, а також формування напруги АРП.

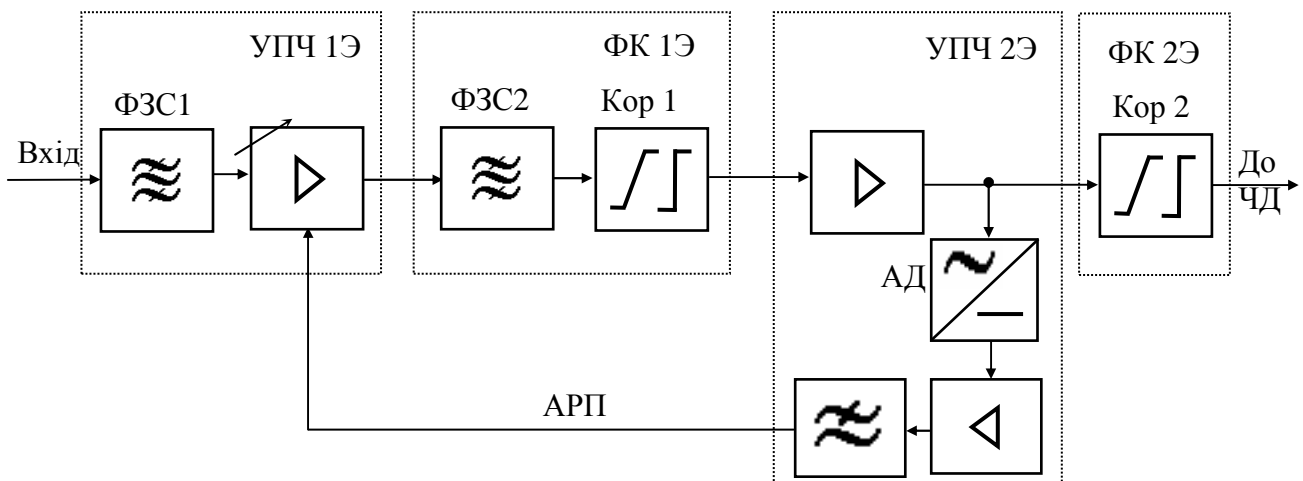


Рисунок 5 – Структурна схема тракту ПЧ приймача ППСТ-78

Основні технічні дані тракту ПЧ:

- центральна частота тракту ПЧ $f_{\text{пч}} = 70$ МГц;
- селективність по сусідньому каналу (при розстроюванні ± 25 МГц) не менше 40 дБ.

Технічні характеристики УПЧ 1Э:

- коефіцієнт підсилення не менше 13 дБ;
- нерівномірність АЧХ у смузі (70 ± 12) МГц не більше 0,5 дБ;
- ослаблення при разстроюванні ± 30 МГц не менше 25 дБ.

У блоці ФК 1Э розташований ФЗС-2, призначений для збільшення селективності по сусідньому каналу. Коректор Кор 1 забезпечує корекцію характеристик ГЧЗ і АЧХ блоків УПЧ 1Э і ФК 1Э. Технічні характеристики блоку ФК 1Э:

- нерівномірність АЧХ у смузі (70 ± 10) МГц не більше 0,5 дБ;
- нерівномірність характеристики ГЧЗ разом з блоком УПЧ 1Э у смузі (70 ± 10) МГц не більше 6 нс;

У блоці УПЧ 2Э здійснюється підсилення сигналу, формування сигналу АРП, який подається на блок УПЧ 1Э.

Коректор Кор 2 блоку ФК 2Э забезпечує корекцію характеристик ГЧЗ і АЧХ тракту демодуляції.

6.2 Детектор ЧМ. Структурна схема стандартного частотного детектора наведена на рис. 6.

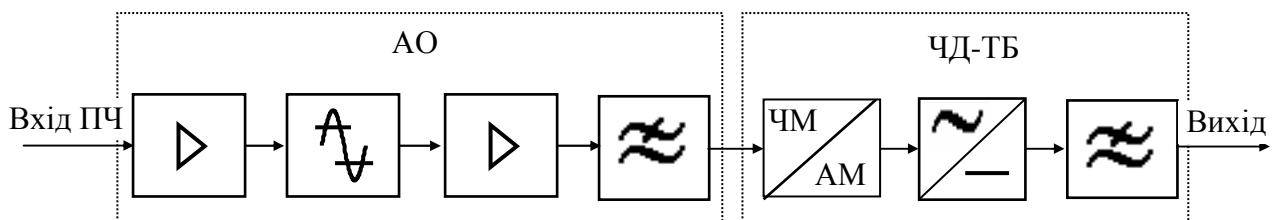


Рисунок. 6 – Структурна схема стандартного ЧД

Амплітудний обмежувач (АО) призначений для ослаблення паразитної амплітудної модуляції ЧМ сигналу. Він забезпечує коефіцієнт ослаблення АМ не менше 26 дБ. Для ослаблення гармонік, що виникають внаслідок дії обмежувача, на виході блоку увімкнений ФНЧ із частотою зрізу 90 МГц.

Блок ЧД-ТБ призначений для детектування ЧМ сигналу з проміжною частотою 70 МГц. ЧД виконаний на двох взаєморозстроєних контурах і двох амплітудних детекторах, навантаження яких зустрічно з'єднані. ФНЧ після ЧД забезпечує корекцію передспотворень.

7 Вимоги до звіту

7.1 **Назва** лабораторної роботи.

7.2 **Мета** роботи.

7.3 **Результати** виконання домашнього завдання.

7.4 До **протоколу** виконання лабораторної роботи заносяться:

- структурні схеми вимірювань;
- список використаних приладів з їхніми характеристиками;
- таблиці і графіки результатів вимірювань за кожним з пунктів завдання.

ня.

7.5 **Висновки** за кожним пунктом виконаного лабораторного завдання:

- відповідність АЧХ стандартному шаблону;
- відповідність селективності по сусідньому каналу приймача нормам;

– оцінка протяжності лінійної ділянки детекторної характеристики ЧД.

7.6 Дата, підпис студента, віза викладача з оцінкою за 100-бальною шкалою.

Література

1 **Спутниковое вещание** / Кантор Л. Я. и др. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.

2 **EUTELSAT Earth Stations Standard V-1. Document IESS-300 (ISSUE 2 Rev.0)**, 6 December 1996. – 36 p.

Лабораторна робота 4

ВИВЧЕННЯ ПРИНЦИПУ І ПРИСТРОЇВ РОЗДІЛЕННЯ СИГНАЛІВ ЗА ФОРМОЮ

1 Мета роботи

1.1 Вивчення принципу і пристроїв розділення сигналів за формою на основі узгоджених фільтрів.

1.2 Вивчення й експериментальна перевірка властивостей фільтрів, узгоджених зі складними сигналами.

2 Ключові положення

2.1 Задача розділення сигналів виникає і вирішується в системах багатоканального передавання та в системах множинного доступу до спільного каналу передавання. Спільним каналом передається груповий сигнал – сума каналних сигналів (сигналів окремих користувачів) $s_i(t)$:

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} s_i(t), \quad (1)$$

де N – число каналів зв'язку (користувачів).

У цій роботі розглядається передавання каналами цифрових сигналів, тому каналні сигнали записуються

$$s_i(t) = a_i \psi_i(t), \quad i = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2)$$

де a_i – коефіцієнт, що відображує інформацію, яка передається i -м каналом зв'язку;

$\psi_i(t)$ – переносник i -го каналу зв'язку.

Розділення сигналів полягає у виділенні бажаного каналного сигналу $s_i(t)$ з суми (1) або відновленні параметра a_i .

2.2 У загальному випадку сигнали можна розділити, коли переносники належать системі лінійно-незалежних функцій. Схема розділення більш проста, коли переносники належать системі ортогональних функцій, тобто в часовій області вони попарно задовольняють умові

$$\int_0^T \psi_i(t) \psi_j(t) dt = \begin{cases} E_{\psi_i}, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \quad i, j = 0, 1, \dots, N-1, \end{cases} \quad (3)$$

де $(0, T)$ – інтервал ортогональності;

E_{ψ_i} – енергія i -го переносника; якщо $E_{\psi_i} = 1$ для всіх i , то переносники належать системі ортонормованих функцій.

Умові (3) задовольняють сигнали при часовому і частотному розділенні та розділенні за формою.

2.3 У системах рухомого зв'язку з розділенням за формою як переносники широко використовуються послідовності імпульсів – складні переносники. Зокрема, це функції Уолша. Повна система ортогональних функцій Уолша містить $N = 2^k$ (k – ціле число) переносників, кожний з яких складений з N дворів-

невих імпульсів. На рис. 1 наведено систему функцій Уолша при $N = 8$ ($k = 3$). У сучасних технологіях використовуються функції Уолша з $k = 2-8$.

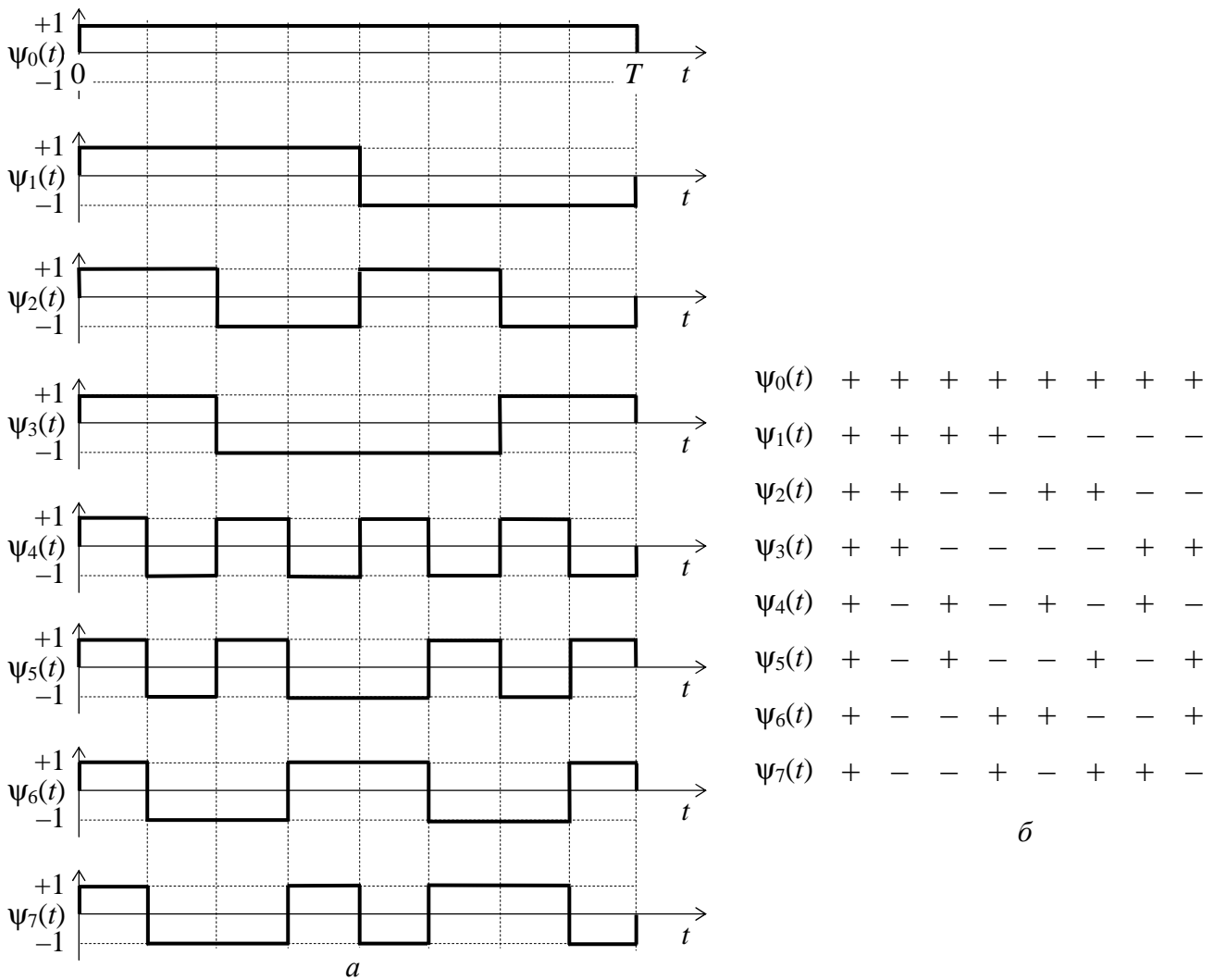


Рисунок 1 – Функції Уолша: а – подання функціями часу; б – спрощене подання

2.4 Для побудови пристроїв розділення сигналів за формою використовуються узгоджені фільтри (УФ) завдяки наступним властивостям: форма сигналу на виході УФ визначається функцією взаємної кореляції вхідного сигналу і сигналу, з яким фільтр узгоджений; якщо ж на вхід УФ подається сигнал, з яким фільтр узгоджений, то форма сигналу на виході визначається функцією кореляції вхідного сигналу. При подачі на вхід фільтра, узгодженого з сигналом $s_i(t)$, групового сигналу (1) отримаємо

$$y_i(t) = c \sum_{j=0}^{N-1} K_{sj si}(t - t_0), \tag{4}$$

де c – довільний додатний коефіцієнт;

$K_{sj si}(t)$ – функція взаємної кореляції сигналів $s_j(t)$ і $s_i(t)$;

t_0 – момент взяття відліку на виході УФ ($t_0 \geq T$).

Коли переносники ортогональні, то $K_{sj si}(0) = 0$ для усіх j крім $j = i$. Якщо переносники до того ж нормовані і $c = 1$, то

$$y_i(t_0) = a_i. \quad (5)$$

2.5 Коли у спільному каналі діє завада, то в момент відліку t_0 на виході фільтра, узгодженого з сигналом $s_i(t)$, має місце максимальне відношення миттєвої потужності сигналу a_i^2 до середньої потужності завади $P_{\text{ш}}$: $\rho_{\text{пік}} = a_i^2/P_{\text{ш}}$. Це відношення залежить від енергії E_i сигналу $s_i(t)$, яка дорівнює a_i^2 , коли переносники ортонормовані, і спектральної густини потужності завади N_0 (вважаємо, що завада – білий шум) і визначається

$$\rho_{\text{пік}} = 2E_i/N_0. \quad (6)$$

2.6 Для побудови схем фільтрів, узгоджених з функціями Уолша, скористаємось властивістю: імпульсна реакція УФ є дзеркальним відображенням сигналу, з яким фільтр узгоджений:

$$g_i(t) = c\psi_i(t_0 - t). \quad (7)$$

Функції Уолша можна записати як суму зсунутих за часом П-імпульсів:

$$\psi_i(t) = \sum_{n=0}^{N-1} p_{i,n} \Pi(t - n\tau_0), \quad (8)$$

де
$$\Pi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < \tau_0, \\ 0, & t < 0, t \geq \tau_0, \end{cases} \quad (9)$$

– П-імпульс амплітуди 1 і тривалістю $\tau_0 = T/N$;

$p_{i,n}$, $n = 0, 1, \dots, N - 1$ – коефіцієнти, які приймають значення +1 і -1 й визначають полярності імпульсів.

На рис. 2 наведено імпульсну реакцію фільтра, узгодженого з функцією $\psi_7(t)$, за умови, що $c = 1$, а $t_0 = T$. Схему такого фільтра побудовано на рис. 3. Фільтр, узгоджений з $\Pi(t)$, формує П-імпульс тривалістю τ_0 . На відводах лінії затримки мають місце зсунуті за часом П-імпульси. Ці імпульси поступають на суматор безпосередньо, якщо відповідний коефіцієнт $p_{i,n} = +1$, або через інвертор, якщо $p_{i,n} = -1$.

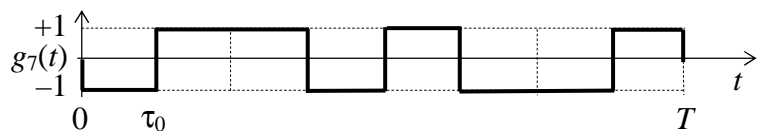


Рисунок 2 – Імпульсна реакція фільтра, узгодженого з переносником $\psi_7(t)$

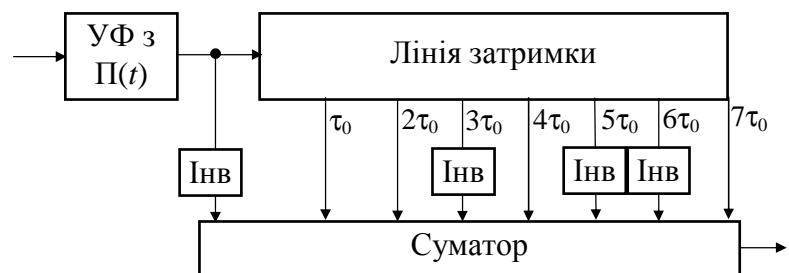


Рисунок 3 – Схема фільтра, імпульсну реакцію якого наведено на рис. 2

2.7 Схему узгодженого фільтра можна отримати і на основі спектрального підходу. Передавальна функція фільтра, узгодженого з переносником $\psi_i(t)$, описується співвідношенням

$$H_i(j\omega) = cS_{\psi_i}^*(j\omega) e^{-j\omega t_0}, \quad (10)$$

де $S_{\psi_i}^*(j\omega)$ – функція, комплексно спряжена зі спектральною густиною переносника $\psi_i(t)$.

На основі співвідношення (8) можна записати спектральну густину переносника $\psi_i(t)$

$$S_{\psi_i}(j\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} p_{i,n} S_{\Pi}(j\omega) e^{-j\omega n \tau_0}, \quad (11)$$

де $S_{\Pi}(j\omega)$ – спектральна густина Π -імпульсу.

Підстановка (11) в (10) за умови, що $c = 1$, а $t_0 = T = n\tau_0$, дає

$$H_i(j\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} p_{i,n} S_{\Pi}^*(j\omega) e^{j\omega n \tau_0} e^{-j\omega T} = S_{\Pi}^*(j\omega) e^{-j\omega \tau_0} \sum_{n=0}^{N-1} p_{i,n} e^{-j\omega(N-1-n)\tau_0}. \quad (12)$$

Отриманий вираз для передавальної функції визначає схему фільтра у вигляді каскадного з'єднання двох функціональних вузлів:

1) множник перед знаком суми відповідає передавальній функції фільтра, узгодженого з Π -імпульсом тривалістю τ_0 ;

2) сума відповідає схемі підсумовування затриманих на час $(N-1-n)\tau_0$ і помножених на коефіцієнти $p_{i,n}$ копій вхідної дії, коли n приймає значення $0, 1, \dots, N-1$.

3 Ключові питання

3.1 У чому полягає задача розділення сигналів? Навести приклади, де вона виникає.

3.2 Що таке розділення за формою? Які пристрої використовуються для розділення за формою?

3.3 Який фільтр називається узгодженим?

3.4 Записати вирази для передавальної функції й імпульсної реакції фільтра, узгодженого із заданим сигналом.

3.5 Яку форму має відгук УФ при подачі на його вхід сигналу, з яким він узгоджений?

3.6 Яку форму має відгук УФ при подачі на його вхід сигналу, з яким він не узгоджений?

3.7 Як визначається відношення сигнал/шум на виході УФ?

3.8 Зобразити схему фільтра, узгодженого зі складним сигналом.

4 Домашнє завдання

4.1 Вивчити основні положення розділу “Узгоджений фільтр” та “Розділення сигналів за формою” за конспектом лекцій і літературою [1, с. 180...184, 359...364; 2, с. 174...180, 272...275].

4.2 У табл. 1 задані дві функції Уолша: $\psi_i(t)$ і $\psi_j(t)$ (N – номер лабораторного стенда). Для них розрахувати і побудувати графіки функцій кореляції $K_{\psi_i}(\tau)$ і $K_{\psi_j}(\tau)$ та функцій взаємної кореляції $K_{\psi_i\psi_j}(\tau)$ і $K_{\psi_j\psi_i}(\tau)$. Приклади розрахунків функції кореляції і функції взаємної кореляції складних сигналів дані в Додатку А.

Таблиця 1 – Функції Уолша для домашнього завдання

N	1	2	3	4	5	6
Пара функцій	$\psi_2(t), \psi_3(t)$	$\psi_3(t), \psi_4(t)$	$\psi_4(t), \psi_5(t)$	$\psi_5(t), \psi_6(t)$	$\psi_6(t), \psi_7(t)$	$\psi_3(t), \psi_7(t)$
N	7	8	9	10	11	12
Пара функцій	$\psi_2(t), \psi_4(t)$	$\psi_3(t), \psi_6(t)$	$\psi_2(t), \psi_6(t)$	$\psi_5(t), \psi_7(t)$	$\psi_4(t), \psi_7(t)$	$\psi_2(t), \psi_5(t)$

4.3 Зобразити схеми фільтрів, узгоджених із заданими переносниками.

4.4 Підготуватись до обговорення за ключовими питаннями.

5 Лабораторне завдання

5.1 *Запустити програму 4*, використовуючи іконку “Лабораторні роботи” на робочому столі, а потім папку “УПОС”. Вивчити схему макета.

5.2 *Налаштувати генератори сигналів 1 і 2* для заданих у домашньому завданні переносників. Для цього використати кнопки +/- . Запустити програму, коли перемикач S знаходиться в положенні “Сигнал 1”, а потім – “Сигнал 2”, і переконатись, що на виходах генераторів мають місце задані переносники. Занести до протоколу графіки складних сигналів. Впевнитись, що при зміні інформаційних символів змінюються полярності складних сигналів.

5.3 *Налаштувати схеми фільтрів, узгоджених з заданими переносниками*. Для цього використати кнопки +/- у відводах лінії затримки. Генератор шуму вимкнутий. Подати на вхід фільтрів δ -функцію. Впевнитись, що імпульсні реакції фільтрів відповідають заданим переносникам. Занести до протоколу графіки імпульсних реакцій фільтрів.

5.4 *Дослідити відгуки фільтрів на складні сигнали*. Для цього подати на вхід фільтрів сигнал від генератора 1. Занести до протоколу графіки відгуків фільтрів і порівняти їх з розрахованими у домашньому завданні. Повторити це дослідження, подаючи на вхід фільтрів сигнал від генератора 2.

5.5 *Дослідити розділення сигналів за формою*. Для цього подати на вхід фільтрів сигнал від генератора 1. Занести до протоколу значення відліків на виходах фільтрів $y_1(t_0)$ і $y_2(t_0)$. Повторити це, подаючи на вхід фільтрів сигнал від генератора 2. Подати на вхід фільтрів суму сигналів від генераторів 1 і 2, записати значення відліків. Повторити це, змінюючи інформаційні символи на входах генераторів. Зробити висновки відносно розділення сигналів за формою.

5.6 *Перевірити виконання співвідношення (6)*. Установити перемикач S у положення 0, увімкнути генератор шуму. Після виконання програми записати значення середньоквадратичних відхилень (СКВ) σ_1 і σ_2 на виходах фільтрів. Значення $\rho_{\text{пик}}$ розраховується як відношення $y_i^2(t_0)$, коли на вхід фільтра подається сигнал, з яким він узгоджений, до σ^2 (як σ рекомендується взяти середнє σ_1 і σ_2). Енергії сигналів визначаються $E_i = P_s \cdot T$, середня потужність P_s і тривалість T сигналів визначаються з графіків сигналів. Значення N_0 задано в опису лабораторного макета.

Розбіжність лівої і правої частин рівняння (6) може складати десятки відсотків. Це пояснюється тим, що реалізації шуму при комп'ютерному моделю-

ванні відносно короткі, і середня потужність шуму істотно змінюється від реалізації до реалізації (у цьому можна переконатися, запускаючи повторно програму і реєструючи значення СКВ).

6 Опис лабораторного макета

Лабораторна робота виконується на комп'ютері в середовищі HP VEE з використанням віртуального макета, структурна схема якого наведена на рис. 4.

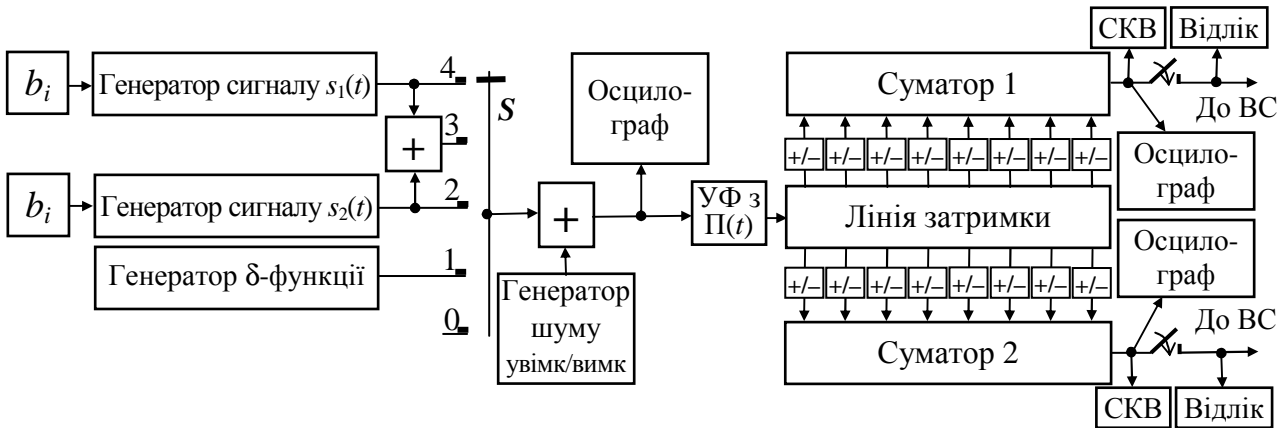


Рисунок 4 – Структурна схема макета

Макет містить “Генератор сигналу 1” і “Генератор сигналу 2”, які дозволяють формувати сигнали тривалістю 8 мс на основі функцій Уолша з $N = 8$, використовуючи кнопки “+/-”. До входів кожного з генераторів підімкнені генератори двійкових символів b_i (1/0), які повинні передаватись складними сигналами.

Генератор δ -функції призначений для дослідження імпульсних реакцій УФ.

Перемикач S дозволяє вибрати для дослідження один зі складних сигналів або їх суму, або δ -функцію.

Генератор шуму виробляє реалізацію квазібілого шуму зі спектральною густиною потужності $N_0 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ В}^2/\text{Гц}$. Генератор шуму може бути вимкненим.

Фільтри, узгоджені зі складними сигналами, виконуються на основі фільтра, узгодженого з Π -імпульсом, ліній затримки з відводами, повторювачів/інверторів у відводах (+/-) і суматорів. З виходів цих фільтрів беруться відліки для вирішуючої схеми (ВС).

Макет містить вимірники та числові дисплеї відліків і середньоквадратичних відхилень шумів на виходах УФ, осцилографи.

7 Вимоги до звіту

7.1 Назва лабораторної роботи.

7.2 Мета лабораторної роботи.

7.3 Результати виконання домашнього завдання.

7.4 Структурні схеми досліджень і результати виконання пп. 5.2, ..., 5.5 лабораторного завдання (осцилограми, числові значення).

7.5 Висновки за кожним пунктом завдання, в яких дати аналіз отриманих результатів – збіг теоретичних і експериментальних даних.

7.6 Дата, підпис студента, віза викладача з оцінкою за 100-бальною системою оцінювання.

Література

1 **Теория электрической связи:** Учебник для вузов / А.Г. Зюко и др.; Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 1998. – 432 с.

2 **Теория передачи сигналов:** Учебник для вузов / А.Г. Зюко и др. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.

ДОДАТОК А

Розрахунки кореляційних функцій складних сигналів

Функція кореляції неперіодичного сигналу $s_1(t)$ і функція взаємної кореляції неперіодичних сигналів $s_1(t)$ і $s_2(t)$ тривалістю T визначаються (для $-T \leq \tau \leq T$)

$$K_{s_1}(\tau) = \int_{-T}^T s_1(t) s_1(t + \tau) dt; \quad K_{s_1 s_2}(\tau) = \int_{-T}^T s_1(t) s_2(t + \tau) dt. \quad (\text{A.1})$$

Розглянемо складні сигнали, що представляють собою послідовності П-імпульсів

$$s_i(t) = \sum_{n=0}^{N-1} p_{i,n} \Pi(t - n\tau_0), \quad (\text{A.2})$$

де $\Pi(t)$ – прямокутний імпульс амплітуди, що дорівнює 1, і тривалістю τ_0 ;
 $p_{i,n}$ – коефіцієнти, що приймають значення +1 або -1, $n = 0, 1, \dots, N-1$;
 N – число імпульсів у послідовності.

У сигналів, що складаються з П-імпульсів, кореляційні функції являють собою ламані лінії, і для побудови їх графіків достатньо розрахувати значення функцій для τ , кратних τ_0 . Після підстановки виразу (A.2) в (A.1) одержимо співвідношення, що визначають значення кореляційних функцій сигналів для значень τ , кратних τ_0

$$K_{s_1}(k\tau_0) = \sum_{n=0}^{N-1} p_{1,n} p_{1,n+k}, \quad K_{s_1 s_2}(k\tau_0) = \sum_{n=0}^{N-1} p_{1,n} p_{2,n+k}. \quad (\text{A.3})$$

Тривалість сигналу $T = N\tau_0$, тому необхідно розрахувати значення кореляційних функцій для $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(N-1)$, для $k \geq \pm N$ значення кореляційних функцій нульові.

Для прикладу проведемо розрахунок функції кореляції переносника $\psi_5(t)$. Оскільки функція кореляції будь-якого сигналу – парна функція, досить розрахувати значення $K_{\psi_5}(\tau)$ для $k \geq 0$. Обчислення за формулою (A.3) зручно провести, використовуючи спрощене подання функції Уолша (рис. 1,б). Взірєць розрахунку наведено в табл. А.1.

Таблиця А.1 – Розрахунок перших трьох значень функції кореляції переносника $\psi_5(t)$

$k = 0$	\times	$\begin{array}{cccccccc} + & - & + & - & - & + & - & + \\ + & - & + & - & - & + & - & + \\ \hline + & + & + & + & + & + & + & + \end{array}$	$K_{\psi_5}(0) = 8$
$k = 1$	\times	$\begin{array}{cccccccc} + & - & + & - & - & + & - & + \\ + & - & + & - & - & + & - & + \\ \hline - & - & - & + & - & - & - & - \end{array}$	$K_{\psi_5}(\tau_0) = -5$
$k = 2$	\times	$\begin{array}{cccccccc} + & - & + & - & - & + & - & + \\ + & - & + & - & - & + & - & + \\ \hline + & + & - & - & + & + & - & - \end{array}$	$K_{\psi_5}(2\tau_0) = 2$

Графік нормованої функції кореляції переносника $\psi_5(t)$ наведено на рис. А.1.

Ще один приклад – розрахунок функції взаємної кореляції переносників $\psi_3(t)$ і $\psi_5(t)$. Значення функції взаємної кореляції слід розраховувати для $-(N - 1) \leq k \leq N - 1$. Обчислення за формулою (А.3) проводяться, використовуючи спрощене подання функцій Уолша (рис. 1,б). Взірець розрахунку наведено в табл. А.2.

Таблиця А.2 – Розрахунок деяких значень функції взаємної кореляції переносників $\psi_3(t)$ і $\psi_5(t)$

$k = 7$	\times	$\begin{array}{cccccccc} & & & & & & + & + & - & - & - & - & + & + \\ + & - & + & - & - & + & - & + & & & & & & & \\ \hline & & & & & & + & & & & & & & & \end{array}$	$K_{\psi_3\psi_5}(7\tau_0) = 1$
$k = 6$	\times	$\begin{array}{cccccccc} & & & & & & + & + & - & - & - & - & + & + \\ + & - & + & - & - & + & - & + & & & & & & & \\ \hline & & & & & & - & + & & & & & & & \end{array}$	$K_{\psi_3\psi_5}(6\tau_0) = 0$
		\vdots	
$k = 3$	\times	$\begin{array}{cccccccc} & & & & & & + & + & - & - & - & - & + & + \\ & & & & & & + & - & + & - & - & + & - & + \\ \hline & & & & & & - & - & - & + & - & & & \end{array}$	$K_{\psi_3\psi_5}(3\tau_0) = -3$
		\vdots	
$k = 0$	\times	$\begin{array}{cccccccc} & & & & & & + & + & - & - & - & - & + & + \\ & & & & & & + & - & + & - & - & + & - & + \\ \hline & & & & & & + & - & - & + & + & - & - & + \end{array}$	$K_{\psi_3\psi_5}(0) = 0$
		\vdots	
$k = -5$	\times	$\begin{array}{cccccccc} & & & & & & + & + & - & - & - & - & + & + \\ & & & & & & + & - & + & - & - & + & - & + \\ \hline & & & & & & - & - & + & & & & & \end{array}$	$K_{\psi_3\psi_5}(-5\tau_0) = -1$

Графік нормованої функції взаємної кореляції переносників $\psi_3(t)$ і $\psi_5(t)$ наведено на рис. А.2.

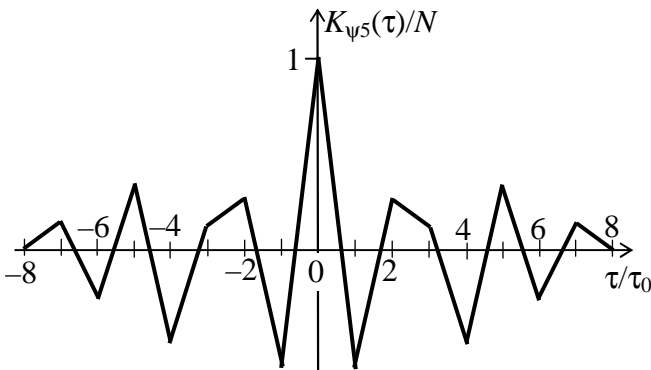


Рисунок А.1 – Нормована функції кореляції переносника $\psi_5(t)$

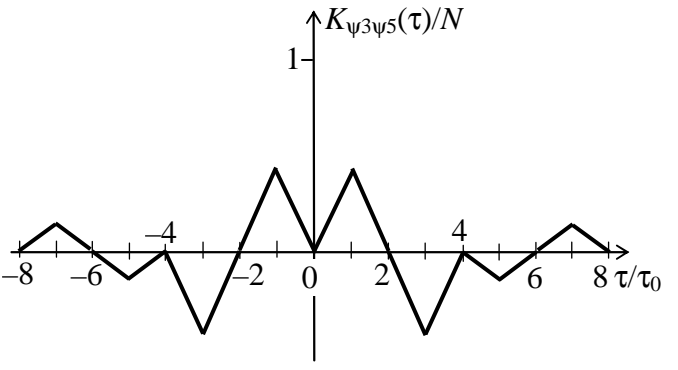


Рисунок А.2 – Нормована функція взаємної кореляції переносників $\psi_3(t)$ і $\psi_5(t)$

Лабораторна робота 5

ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ ОПТИМАЛЬНИХ ДЕМОДУЛЯТОРІВ СИГНАЛІВ ДВІЙКОВИХ ВИДІВ МОДУЛЯЦІЇ

1 Мета роботи

1.1 Вивчення функціональних схем оптимальних когерентних демодуляторів сигналів АМ-2, ЧМ-2 і ФМ-2.

1.2 Дослідження перетворень сигналів в окремих блоках демодуляторів.

2 Ключові положення

2.1 На вхід демодулятора надходить сума переданого модульованого сигналу $s(t)$ і завади $n(t)$: $z(t) = s(t) + n(t)$. За сигналом $z(t)$ демодулятор повинен відновити цифровий сигнал. Критерієм оптимальності є мінімум ймовірності помилки двійкового символу цифрового сигналу.

2.2 Сигнал цифрової модуляції $s(t)$ – це послідовність радіоімпульсів, що відображують цифровий сигнал і проходять через тактовий інтервал T :

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s_i^{(k)}(t - kT), \quad (1)$$

де $s_i(t)$, $i = 0, \dots, M - 1$ – елементарні сигнали (радіоімпульси);

M – число елементарних сигналів;

$s_i^{(k)}(t - kT)$ – i -й радіоімпульс, що передається на k -му тактовому інтервалі.

Радіоімпульси можуть відрізнятися амплітудами, фазами або частотами. Існують різні види цифрової модуляції: АМ- M , ФМ- M , АФМ- M , КАМ- M , ЧМ- M . Якщо $M = 2$, то має місце двійковий сигнал $s(t)$, при цьому радіоімпульс $s_0(t)$ використовується для передавання 0, а радіоімпульс $s_1(t)$ – для передавання 1.

2.3 Опис елементарних сигналів АМ-2, ЧМ-2 і ФМ-2 надається в табл. 1.

Таблиця 1 – Опис елементарних сигналів $s_i(t)$

i	Метод модуляції		
	АМ-2	ЧМ-2	ФМ-2
1	$a \cdot \sqrt{2} A(t) \sin 2\pi f_0 t$	$a \cdot \sqrt{2} A(t) \sin(2\pi(f_0 + \Delta f/2)t)$	$a \cdot \sqrt{2} A(t) \sin 2\pi f_0 t$
0	0	$a \cdot \sqrt{2} A(t) \sin(2\pi(f_0 - \Delta f/2)t)$	$a \cdot \sqrt{2} A(t) \sin(2\pi f_0 t + \pi) = -a \cdot \sqrt{2} A(t) \sin 2\pi f_0 t$

У цій таблиці:

a – коефіцієнт, що визначає енергію i -го елементарного сигналу;

$A(t)$ – обвідна елементарних сигналів – функція, що описує форму радіоімпульсів;

f_0 – частота несінного коливання;

Δf – рознесення частот при ЧМ-2.

З табл. 1 випливає, що при АМ-2 інформація закладена в амплітуді радіоімпульсу $s_i(t)$, при ФМ-2 – в полярності радіоімпульсу $s_i(t)$, при ЧМ-2 – в частоті радіоімпульсу $s_i(t)$.

2.4 Вважають, що завада $n(t)$ – гауссів квазібілий шум. Його спектр рівномірний і зосереджений у смузі пропускання каналу зв'язку F_k .

2.5 Демодулятор виконує незалежну демодуляцію кожного з елементарних сигналів, що послідовно передаються. Демодуляція зводиться до визначення номера i переданого сигналу на кожному тактовому інтервалі. Нижче будемо вважати, що обговорюється робота демодулятора на тактовому інтервалі $k = 0$, тобто

$$z(t) = s_i(t) + n(t). \quad (2)$$

2.6 При АМ-2 і ФМ-2

$$s_i(t) = a_i \sqrt{2} A(t) \sin 2\pi f_0 t, \quad (3)$$

і коефіцієнти a_i відображують символи, що передаються. Алгоритм роботи оптимальних демодуляторів цих сигналів наступний.

1) Виконується когерентне детектування сигналу $z(t)$. Схема відновлення несівної (ВН) створює коливання $\sqrt{2} \sin 2\pi f_0 t$, що необхідне для роботи детектора. Якщо врахувати, що смуговий шум представляється квадратурними складовими

$$n(t) = N_c(t) \sqrt{2} \cos 2\pi f_0 t + N_s(t) \sqrt{2} \sin 2\pi f_0 t, \quad (4)$$

то на виході детектора отримаємо

$$u_{\text{дет}}(t) = \underbrace{[a_i A(t) + N_s(t)]}_{\text{НЧ складові}} + \underbrace{[a_i A(t) + N_s(t)] \sin 2\pi 2f_0 t}_{\text{Сигнал БМ на несівній } 2f_0}. \quad (5)$$

Оскільки шум квазібілий у смузі частот каналу зв'язку F_k із середньою частотою f_0 , то шум $N_s(t)$ – квазібілий в інтервалі частот $(0, F_k/2)$.

2) Виконується фільтрація НЧ складових фільтром, узгодженим з сигналом $A(t)$. На виході УФ отримуємо

$$u_{\text{УФ}}(t) = a_i P(t) + N_s^\Phi(t), \quad (6)$$

де $P(t)$ – відгук УФ на імпульс $A(t)$;

$N_s^\Phi(t)$ – результат фільтрації завади $N_s(t)$.

З теорії узгоджених фільтрів відомо, що

$$P(t) = c K_A(t - t_0), \quad (7)$$

де $K_A(\tau)$ – функція кореляції сигналу $A(t)$;

t_0 – момент відліку, коли миттєве значення імпульсу $P(t)$ максимальне (під час синтезу УФ враховують, що $t_0 \geq T_A$, T_A – тривалість сигналу $A(t)$);

c – довільний додатний коефіцієнт (під час синтезу УФ вибирається таким, щоб $P(t_0) = 1$).

3) Береться відлік сигналу з виходу УФ в момент часу t_0 . Відлікове значення дає оцінку коефіцієнта a_i , який відображує символ, що передається

$$\hat{a} = a_i P(t_0) + N_s^\Phi(t_0) = a_i + N_s^\Phi(t_0), \quad (8)$$

де $N_s^\Phi(t_0)$ – випадкова величина, що має гауссів розподіл імовірностей із нульовим середнім.

Під час демодуляції послідовності елементарних сигналів необхідно виконати дискретизацію з інтервалом T в моменти часу $t_0 + kT$, $k = \dots -1, 0, 1, 2, \dots$.

Правильний вибір цих моментів забезпечує система тактової синхронізації (ТС).

4) На основі оцінки \hat{a} вирішуючою схемою виносяться рішення про переданий сигнал. Правило винесення рішення формується на основі сигнального сузір'я сигналів, що демодулюється. На рис.1 показано сигнальне сузір'я сигналів АМ-2 і ФМ-2. Там же показані умовні густини ймовірності оцінки коефіцієнта, що описує переданий сигнал, $p(\hat{a}/s_1)$ і $p(\hat{a}/s_0)$. Вважаючи, що сигнали $s_1(t)$ і $s_0(t)$ рівноймовірні, рішення слід виносити за максимумом умовної густини ймовірності, а саме, область значень \hat{a} , де $p(\hat{a}/s_1) > p(\hat{a}/s_0)$ є областю сигналу $s_1(t)$, а область значень \hat{a} , де $p(\hat{a}/s_1) < p(\hat{a}/s_0)$ є областю сигналу $s_0(t)$. Рішення виносяться шляхом порівняння оцінки \hat{a} з пороговим значенням $\lambda = \frac{a_1 + a_0}{2}$ за правилом: якщо $\hat{a} > \lambda$, то передавався сигнал $s_1(t)$, а якщо $\hat{a} < \lambda$, то передавався сигнал $s_0(t)$. При АМ-2 $a_1 = a$, $a_0 = 0$, $\lambda = 0,5a$, тобто порогове значення дорівнює половині відлікового значення з виходу УФ при надходженні на вхід демодулятора сигналу $s_1(t)$ без завади. При ФМ-2 $a_1 = a$, $a_0 = -a$, $\lambda = 0$, тобто рішення виносяться за знаком відліку. Після винесення рішення вирішуюча схема видає відповідний символ цифрового сигналу.

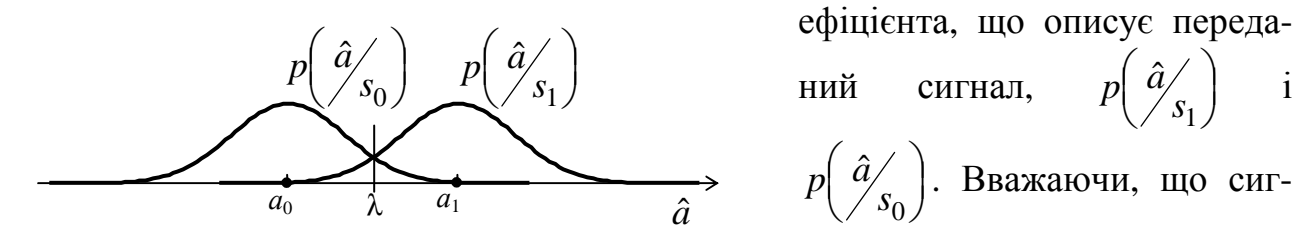


Рисунок 1 – Сигнальне сузір'я сигналів АМ-2 і ФМ-2 й умовні густини ймовірностей оцінки \hat{a}

Рішення виносяться шляхом порівняння оцінки \hat{a} з пороговим значенням $\lambda = \frac{a_1 + a_0}{2}$ за правилом: якщо $\hat{a} > \lambda$, то передавався сигнал $s_1(t)$, а якщо $\hat{a} < \lambda$, то передавався сигнал $s_0(t)$. При АМ-2 $a_1 = a$, $a_0 = 0$, $\lambda = 0,5a$, тобто порогове значення дорівнює половині відлікового значення з виходу УФ при надходженні на вхід демодулятора сигналу $s_1(t)$ без завади. При ФМ-2 $a_1 = a$, $a_0 = -a$, $\lambda = 0$, тобто рішення виносяться за знаком відліку. Після винесення рішення вирішуюча схема видає відповідний символ цифрового сигналу.

На рис. 2 наведена схема демодулятора сигналів АМ-2 і ФМ-2. У схемі виконуються перетворення, що перераховані вище.

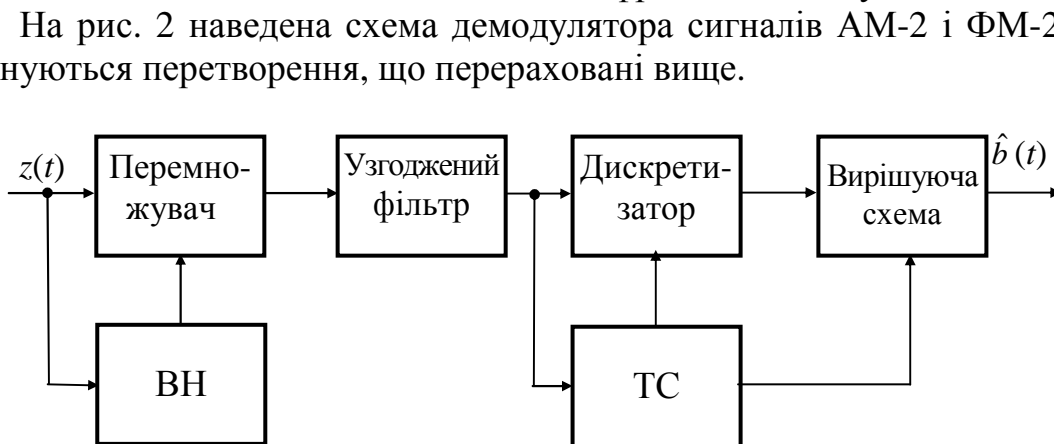


Рисунок 2 – Схема оптимального демодулятора сигналів АМ-2 і ФМ-2

2.6 При ЧМ-2 елементарні сигнали відрізняються частотами радіоімпульсів. У демодуляторі необхідно створити два підканали для роздільного оброблення радіоімпульсів. У кожному з підканалів необхідно виконати перераховані в 2.5 перетворення: когерентне детектування, фільтрацію узгодженими фільтрами і дискретизацію. Схема ВН повинна створювати два коливання: для верх-

нього підканалу $\sqrt{2} \sin(2\pi(f_0+\Delta f/2)t)$ і для нижнього підканалу $\sqrt{2} \sin(2\pi(f_0-\Delta f/2)t)$. З виходів дискретизаторів беруться оцінки амплітуд імпульсів \hat{a}_1 і \hat{a}_0 . Рішення виносяться шляхом порівняння цих оцінок за правилом: якщо $\hat{a}_1 > \hat{a}_0$, то передався сигнал $s_1(t)$, а якщо $\hat{a}_1 < \hat{a}_0$, то передався сигнал $s_0(t)$. Схема оптимального демодулятора сигналу ЧМ-2 наведена на рис. 3.

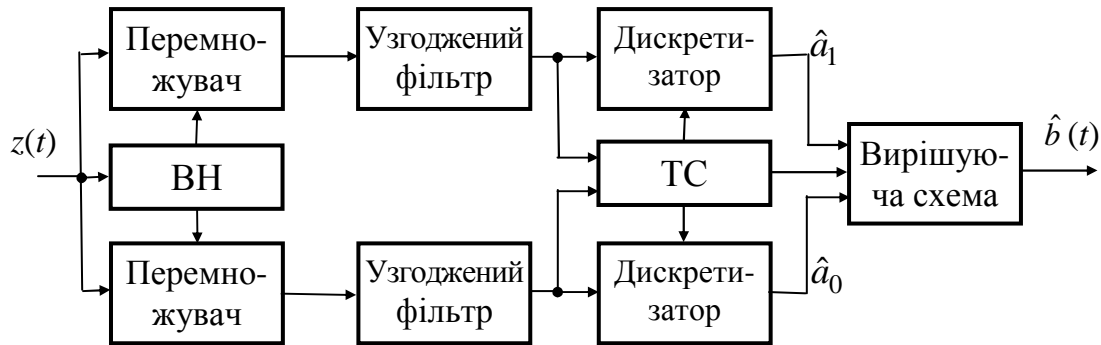


Рисунок 3 – Схема оптимального демодулятора сигналу ЧМ-2

2.7 У цій лабораторній роботі елементарні сигнали, що передаються, мають П-подібну обвідну:

$$A(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T, \\ 0, & t < 0, t > T. \end{cases} \quad (9)$$

Нагадаємо, що функція кореляції П-імпульсу за формою є рівнобедреним трикутником, основа якого дорівнює $2T$. Саме такий за формою сигнал повинен спостерігатись на виході фільтра, узгодженого з П-імпульсом, якщо на його вхід поступає П-імпульс.

2.8 Оскільки сигнали $s_1(t)$ і $s_0(t)$ рівноймовірні, то схема відновлення несінхронної, побудована на основі ФАПЧ, може увійти в синхронізм з сигналом $s_1(t)$ або $s_0(t)$. Алгоритм демодуляції сигналу ФМ-2 потребує, щоб схема ВН виробляла коливання $\sqrt{2} \sin 2\pi f_0 t$, що збігається за фазою з сигналом $s_1(t)$. Якщо ж ВН виробляє коливання, що збігається за фазою з сигналом $s_0(t)$, то це призводить до інверсії всіх напруг на виходах перемножувача, узгодженого фільтра і дискретизатора і, як наслідок, до інверсного цифрового сигналу на виході демодулятора. Таке явище називається інверсною роботою демодулятора. Позбавитись від інверсної роботи дає перехід до відносного методу передавання, коли біти, що передаються, відображуються не в початковій фазі радіоімпульсів (ФМ-2), а в різницю фаз сусідніх радіоімпульсів (відносна фазова модуляція – ВФМ-2).

3 Ключові питання

3.1 Пояснити призначення модулятора і демодулятора під час передавання цифрових сигналів.

3.2 Зобразити часові діаграми сигналів АМ-2, ФМ-2 і ЧМ-2 для цифрового сигналу 101100.

3.3 Сформулювати критерій оптимальності демодуляторів цифрової модуляції.

3.4 Зобразити функціональні схеми демодуляторів сигналів АМ-2, ФМ-2 і ЧМ-2 і пояснити, які перетворення виконує кожний блок.

3.5 Що таке когерентний детектор, і яке призначення схеми відновлення несівної?

3.6 Яку роль відіграють узгоджені фільтри у схемах демодуляторів?

3.7 Яке призначення схеми тактової синхронізації?

3.8 Сформулювати правила винесення рішень вирішуючою схемою демодуляторів сигналів АМ-2, ФМ-2 і ЧМ-2.

4. Домашнє завдання

4.1 Вивчити розділ “Оптимальні демодулятори сигналів цифрових видів модуляції” за конспектом лекцій і літературі [1, с. 163...180, 2, с. 244...247].

4.2 Зобразити функціональні схеми демодуляторів сигналів АМ-2, ФМ-2 і ЧМ-2.

4.3 Записати число $48 + N$ у двійковій системі числення (N – номер вашої бригади). Зобразити отриманий цифровий сигнал, вважаючи, що швидкість $R = 1000$ біт/с. Зобразити часові діаграми сигналів АМ-2, ФМ-2 і ЧМ-2 для цього цифрового сигналу, якщо $A(t)$ – П-імпульс, $f_0 = 4$ кГц, $f_1 = 5$ кГц.

4.4 На вхід демодулятора сигналу АМ-2 подається сигнал АМ-2, отриманий в п. 4.3. Зобразити часові діаграми сигналів в усіх точках функціональної схеми демодулятора: на кожному із входів і виході перемножувача, на виході узгодженого фільтра, на виході дискретизатора, на виході вирішуючої схеми.

4.5 Підготуватись до обговорення за ключовими питаннями.

5 Лабораторне завдання

5.1 Дослідити перетворення сигналів у демодуляторі сигналу АМ-2. Для цього необхідно запустити програму 5а, використовуючи іконку “Лабораторні роботи” на робочому столі, а потім папку УПОС, і вивчити схему макета; установити цифровий сигнал, використаний при виконанні домашнього завдання, шум вимкнути. Запустити програму на виконання. Зарисувати часові діаграми з осцилографів на панелі макета. Порівняти з результатами виконання домашнього завдання.

5.2 Дослідити перетворення сигналів у демодуляторі сигналу ФМ-2. Умови виконання завдання ті ж самі, що і в 5.1. Фаза відновленої несівної дорівнює 0. Зарисувати часові діаграми з осцилографів на панелі макета.

5.3 Дослідити перетворення сигналів у демодуляторі сигналу АМ-2 при демодуляції сигналу з шумом. Умови виконання завдання ті ж самі, що і в 5.1, але генератор шуму увімкнено і рівень шуму 2 умовні одиниці. Запустити програму на виконання й перевірити, чи виникла помилка в прийнятому цифровому сигналі. Якщо не виникла, то повторно запустити програму до появи хоча б однієї помилки. Зарисувати часові діаграми з осцилографів на панелі макета. Пояснити причину виникнення помилок.

5.4 Дослідити перетворення сигналів у демодуляторі сигналу ФМ-2 при демодуляції сигналу з шумом. Умови виконання завдання ті ж самі, що і в 5.3.

Фаза відновленої несівної дорівнює 0. Зарисувати часові діаграми з осцилографів на панелі макета. Пояснити причину виникнення помилок.

5.5 Дослідити перетворення сигналів у демодуляторі сигналу ФМ-2. Фаза відновленої несівної дорівнює 180° . Інші умови виконання завдання ті ж самі, що і в 5.1. Зарисувати часові діаграми з осцилографів на панелі макета. Описати відмінності від осцилограм, отриманих в 5.2.

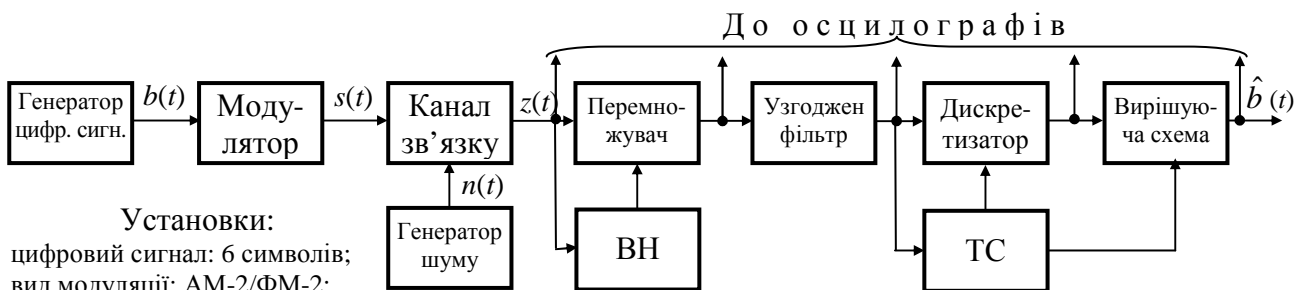
5.6 Дослідити перетворення сигналів у демодуляторі сигналу ЧМ-2. Для цього необхідно запустити програму 5б, використовуючи іконку “Лабораторні роботи” на робочому столі, а потім папку УПОС, і вивчити схему макета; установити цифровий сигнал, використаний при виконанні домашнього завдання. Зарисувати часові діаграми з осцилографів на панелі макета спочатку у верхньому підканалі, а потім у нижньому. Пояснити їх характер.

6 Опис лабораторного макета

Лабораторна робота виконується на комп’ютері в середовищі HP VEE з використанням двох віртуальних макетів.

Макет 5а (рис. 5) призначено для дослідження демодуляторів сигналів АМ-2 і ФМ-2. Він містить:

- генератор цифрового сигналу зі швидкістю 1000 біт/с, сигнал складається з 6 двійкових символів (біт), символи установлюються на панелі макета;
- модулятор сигналів – установлюється АМ-2 або ФМ-2, обвідна радіоімпульсів – П-імпульс, частота несівної 4 кГц;
- модель каналу зв’язку – суматор сигналу і шуму;
- генератор шуму, що надає можливість вмикати та вимикати його, а також установку рівня шуму;
- демодулятор сигналів АМ-2 і ФМ-2 за схемою, наведеною на рис. 2; при зміні в макеті виду модуляції відбувається відповідна зміна правила рішення у вирішуючій схемі; схеми відновлення несівної й тактової синхронізації створюють “ідеальні” коливання; при ФМ-2 можна змінювати фазу відновленої несівної на 180° для імітації інверсної роботи;
- 5 осцилографів для спостереження часових діаграм в усіх точках функціональної схеми демодулятора.



Установки:
цифровий сигнал: 6 символів;
вид модуляції: АМ-2/ФМ-2;
генератор шуму: увім/вимк;
рівень шуму;
фаза опорного коливання при
ФМ-2: $0/180^\circ$

Рисунок 5 – Структурна схема макета для дослідження демодуляторів сигналів АМ-2 і ФМ-2

Макет 5б (рис. 6) призначено для дослідження демодулятора сигналу ЧМ-2. Він містить:

- генератор цифрового сигналу зі швидкістю 1000 біт/с, сигнал складається з 6 двійкових символів (біт), символи встановлюються на панелі макета;
- модулятор сигналу ЧМ-2, обвідна радіоімпульсів – П-імпульс, частоти радіоімпульсів $f_0 - \Delta f/2 = 4$ кГц і $f_0 + \Delta f/2 = 5$ кГц;
- модель каналу зв'язку – неспотворюючий чотириполіусник;
- демодулятор сигналу ЧМ-2 за схемою, наведеною на рис. 3;
- 5 осцилографів для спостереження часових діаграм в усіх точках функціональної схеми демодулятора; осцилографи переключуються для спостереження часових діаграм у верхньому або нижньому підканалі.

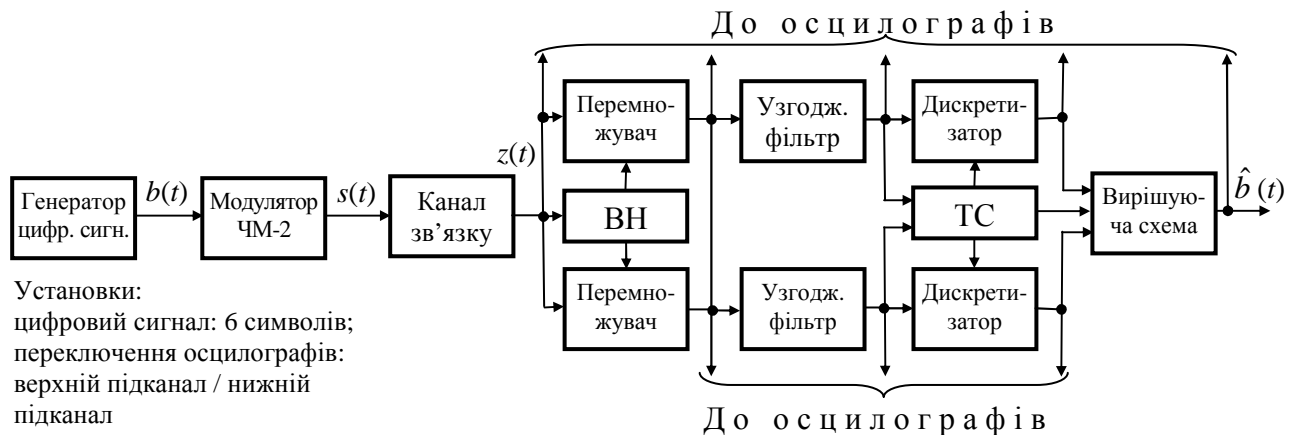


Рисунок 6 – Структурна схема макета для дослідження демодулятора сигналу ЧМ-2

7 Вимоги до звіту

7.1 **Назва** лабораторної роботи.

7.2 **Мета** роботи.

7.3 **Результати** виконання домашнього завдання.

7.4 **Структурні схеми** досліджень та **результати** виконання пп. 5.1...5.6 лабораторного завдання (графіки і пояснення до них).

7.5 **Висновки** за кожним пунктом завдання, в яких надати аналіз отриманих результатів (збіг експериментальних та теоретичних даних).

7.6 Дата, підпис студента, віза викладача з оцінкою за 100-бальною шкалою.

Література

1 **Теорія передачі сигналів**: Учебник для вузів / А. Г. Зюко и др. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.

2 **Панфілов І. П., Дирда В. Ю., Капацін А. В.** Теорія електричного зв'язку: Підручник для вищих навчальних закладів I та II рівнів акредитації за напрямом "Телекомунікації". – К.: Техніка, 1998. – 328 с.

Лабораторна робота 6

ВИВЧЕННЯ ВІДНОСНОГО КОДУВАННЯ Й ДЕКОДУВАННЯ

1 Мета роботи

1.1 Вивчення принципів відносного кодування і декодування.

1.2 Дослідження впливу помилок у каналі зв'язку на результати відносного декодування.

2 Ключові положення

2.1 Сигнал цифрової модуляції $s(t)$ – це послідовність радіоімпульсів, що відображують цифровий сигнал і йдуть через тактовий інтервал T :

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s_i^{(k)}(t - kT), \quad (1)$$

де $s_i(t)$, $i = 0, \dots, M - 1$ – елементарні сигнали (радіоімпульси);

M – число елементарних сигналів;

$s_i^{(k)}(t - kT)$ – i -й радіоімпульс, що передається на k -му тактовому інтервалі.

2.2 При ФМ-2 елементарні сигнали записуються

$$\left. \begin{aligned} s_1(t) &= a \cdot \sqrt{2} A(t) \sin 2\pi f_0 t; \\ s_0(t) &= a \cdot \sqrt{2} A(t) \sin (2\pi f_0 t + \pi) = -a \cdot \sqrt{2} A(t) \sin 2\pi f_0 t, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де a – коефіцієнт, що визначає енергію i -го елементарного сигналу;

$A(t)$ – обвідна елементарних сигналів – функція, що описує форму радіоімпульсів;

f_0 – частота несінного коливання.

Із формули (2) випливає, що при ФМ-2 інформація закладена в полярності радіоімпульсу $s_i(t)$ або в його початковій фазі.

2.3 Оскільки сигнали $s_1(t)$ і $s_0(t)$ рівноймовірні, то схема відновлення несінної демодулятора сигналу ФМ-2, яка побудована на основі ФАПЧ, може увійти в синхронізм з сигналом $s_1(t)$ або $s_0(t)$ – має місце невизначеність фази другого порядку. Алгоритм демодуляції сигналу ФМ-2 вимагає, щоб схема ВН виробляла коливання $\sqrt{2} \sin 2\pi f_0 t$, що збігається за фазою з сигналом $s_1(t)$. Якщо ж ВН виробляє коливання, що збігається за фазою з сигналом $s_0(t)$, то це приводить до інверсного цифрового сигналу на виході демодулятора. Таке явище називається інверсною роботою демодулятора. Позбавитись від інверсної роботи дозволяє перехід до відносного методу передавання, коли біти, що передаються, відображуються не в початковій фазі радіоімпульсів (як при ФМ-2), а в різницю фаз сусідніх радіоімпульсів. Сформований таким чином модульований сигнал називається відносною фазовою модуляцією – ВФМ-2 або фазорізницевою (диференціальною) модуляцією – ФРМ-2.

2.4 Принцип формування і демодуляції сигналів ВФМ-2 відображено на рис. 1. Модулятор сигналу ВФМ-2 складається із відносного кодера (ВК) і модулятора сигналу ФМ-2, а демодулятор сигналу ВФМ-2 – із демодулятора сигналу ФМ-2 і відносного декодера (ВД).

Відносний кодер ВФМ-2 працює за правилом

$$b_k^{\text{відн}} = b_k \oplus b_{k-1}^{\text{відн}}, \quad (3)$$

де b_k – символ 1 або 0 на вході кодера на k -му тактовому інтервалі;

$b_k^{\text{відн}}$ – символ 1 або 0 на виході кодера на k -му тактовому інтервалі;

\oplus – знак додавання за модулем 2.

Відносний декодер модему ВФМ-2 працює за правилом

$$\hat{b}_k = \hat{b}_k^{\text{відн}} \oplus \hat{b}_{k-1}^{\text{відн}}, \quad (4)$$

де $\hat{b}_k^{\text{відн}}$ – символ 1 або 0 на вході відносного декодера на k -му тактовому інтервалі;

\hat{b}_k – символ 1 або 0 на виході відносного декодера на k -му тактовому інтервалі.

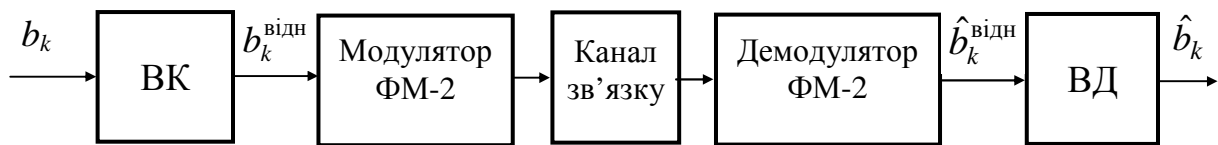


Рисунок 1 – Принцип формування і демодуляції сигналу ВФМ-2

Початкова фаза відновленої несівної в демодуляторі може збігатись з початковою фазою сигналу ФМ-2, що приймається, або відрізнятись від неї на кут π . У загальному виді можна записати, що фаза опорного коливання набуває значення $p \cdot \pi$ ($p = 0$ або 1 – значення, що описує зсув фази). Вважаючи, що завади в каналі зв'язку немає, символи на виході демодулятора ФМ-2 будуть визначатись співвідношенням

$$\hat{b}_k^{\text{відн}} = b_k^{\text{відн}} \oplus p \quad (5)$$

для всіх k . Підставивши вираз (5) у формулу (4), легко упевнитись, що символ \hat{b}_k не залежить від p .

Приклад кодування і декодування довільної послідовності двійкових символів наведено у табл. 1. Таблиця ілюструє кодування, починаючи з $k = 1$. Оскільки при кодуванні на k -му тактовому інтервалі бере участь попередній кодований символ, то у другому рядку

Таблиця 1 – Приклад відносного кодування і декодування

№ рядка		k							
		0	1	2	3	4	5	6	
1	b_k		1	1	0	0	1	0	
2	$b_k^{\text{відн}}$	0	1	0	0	0	1	1	
3	$\hat{b}_k^{\text{відн}}$	0	1	0	0	0	1	1	
4	\hat{b}_k		1	1	0	0	1	0	
5	$\hat{b}_k^{\text{відн}}$	1	0	1	1	1	0	0	
6	\hat{b}_k		1	1	0	0	1	0	

довільно прийнято $b_0^{\text{відн}} = 0$ (читачу пропонується розрахувати таблицю для $b_0^{\text{відн}} = 1$). Рядок 3 повторює рядок 2 – демодуляція без інверсної роботи. Результат декодування дано в рядку 4. Рядок 5 містить інверсію рядка 2 – демодуляція з інверсною роботою. Після декодування відновлений сигнал (рядок 6) збігається з початковим сигналом (рядок 1). Таким чином,

відносно кодування усуває інверсну роботу демодулятора ФМ-2.

2.5 У разі M -ї фазової модуляції з тієї ж причини, що й у разі ФМ-2, має місце невизначеність фази M -го порядку. Аналогічно ВФМ-2 інформація закладається в різницю фаз сусідніх радіоімпульсів і має місце ВФМ- M . При $M > 2$ відносні кодер і декодер працюють з M -ми символами. Перехід від двійкових символів цифрового сигналу, що передається, до M -х канальних символів відбувається в кодері маніпуляційного коду.

2.6 При передаванні цифрових сигналів сигналами ФМ-4 використовуються 4 елементарні сигнали

$$s_i(t) = aA(t)\sqrt{2} \sin\left(2\pi f_0 t + q_i \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right), \quad (6)$$

де q_i – четвіркові символи, що приймають значення 0, 1, 2, 3;

$q_i \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4}$ – початкові фази елементарних сигналів, що приймають значення $\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$.

Початкова фаза відновленої в демодуляторі несівної однозначно визначеною бути не може – вона визначається з точністю до $\pi/2$. Це обумовлено симетрією сигнального сузір'я ФМ-4: при прийманні невідомо, який з чотирьох сигналів вважати “нульовим”.

Щоб усунути вплив неоднозначності фази опорного коливання під час демодуляції сигналу ФМ-4, переходять до модуляції ВФМ-4. Принцип формування і демодуляції сигналів ВФМ-4 відображено на рис. 2. Модулятор сигналу ВФМ-4 складається з кодера маніпуляційного коду, відносного кодера і модулятора сигналу ФМ-4, а демодулятор сигналу ВФМ-4 – з демодулятора сигналу ФМ-4, відносного декодера і декодера маніпуляційного коду. На цьому рисунку й нижче за текстом нижній індекс k визначає номер тактового інтервалу, а зсув q може набувати значення 0, 1, 2 і 3.

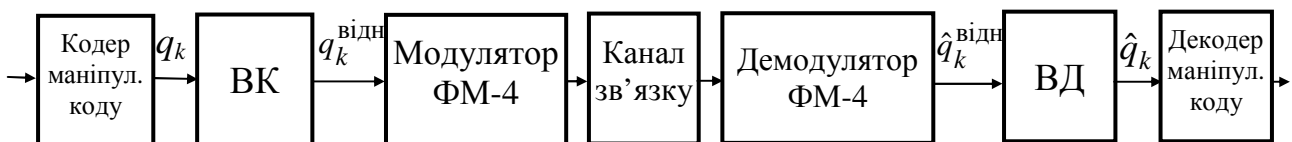


Рисунок 2 – Принцип формування і демодуляції сигналу ОФМ-4

Відносний кодер при ВФМ-4 реалізує правило кодування четвіркових символів:

$$q_k^{\text{відн}} = q_k \oplus q_{k-1}^{\text{відн}}, \quad (7)$$

де \oplus – додавання за модулем 4 (залишок від ділення на 4 арифметичної суми доданків).

Відносний декодер реалізує правило декодування четвіркових символів:

$$\hat{q}_k = \hat{q}_k^{\text{відн}} \ominus \hat{q}_{k-1}^{\text{відн}}, \quad (8)$$

де \ominus – віднімання за модулем 4 (залишок від ділення різниці на 4).

Початкова фаза відновленої несівної в демодуляторі може збігатись з початковою фазою сигналу ФМ-4, що приймається, або відрізнятись від неї на кут $p \cdot \pi/2$ ($p = 0, 1, 2$ або 3 – значення, що описує зсув фази). Вважаючи, що завади в каналі зв'язку немає, символи на виході демодулятора ФМ-4 будуть визначатись співвідношенням

$$\hat{q}_k^{\text{відн}} = q_k^{\text{відн}} \oplus p \quad (9)$$

для усіх k . Таким чином, через неоднозначність фази когерентної несівної в демодуляторі сигналу ФМ-4 усі символи $\hat{q}_k^{\text{відн}}$ отримують приріст p . Якщо підставити вираз (9) у формулу (8), то легко переконатись, що символ \hat{b}_k не залежить від p .

При ВФМ-4 завдяки відніманню в декодері значення p , тобто неоднозначність фази, виключається. Оскільки для виключення неоднозначності фази значення \hat{q}_k визначається як різниця двох сусідніх символів, то при кодуванні значення $q_k^{\text{відн}}$ формується як сума попереднього значення $q_{k-1}^{\text{відн}}$ і символу q_k , що передається.

Правила додавання за модулем 4 наведені в табл. 2, а правила вирахування за модулем 4 – в табл. 3.

Таблиця 2 – Додавання за **mod 4** ($a \oplus b$)

a	b			
	0	1	2	3
0	0	1	2	3
1	1	2	3	0
2	2	3	0	1
3	3	0	1	2

Таблиця 3 – Вирахування за **mod 4** ($a \ominus b$)

a	b			
	0	1	2	3
0	0	3	2	1
1	1	0	3	2
2	2	1	0	3
3	3	2	1	0

При передаванні цифрового сигналу сигналом ФМ-4 перехід від пар біт b_1b_2 до четвіркових символів q на кожному тактовому інтервалі здійснюється у відповідності до маніпуляційного коду Грея, представленого в табл. 4.

Таблиця 4 – Маніпуляційний код Грея

Пара біт b_1b_2	Чотириковий символ q	Початкова фаза сигналу
00	0	45°
10	1	135°
11	2	225°
01	3	315°

Оскільки при демодуляції сигналу ФМ-4 найбільш ймовірні помилки, зводяться до переходів у найближчі сигнали, то при використанні коду Грея такі переходи призводять до помилки лише в одному біті, що мінімізує ймовірність помилки двійкового символу.

У табл. 5 наведено приклад кодування і декодування при передаванні цифрового сигналу методом ВФМ-4. Перехід від пар біт до четвіркових символів здійснюється у відповідності до табл. 4. Прийнято, що значення $p = 3$, а $q_0^{\text{відн}} = 1$. Із даних табл. 5 видно, що прийняті біти збігаються з переданими.

Таблиця 5 – Приклад відносного кодування і декодування четвіркових символів

Номер тактового інтервалу k	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Послідовність біт, що передаються		01	00	11	01	10	11	10	00
Послідовність символів q_k		3	0	2	3	1	2	1	0
Послідовність символів $q_k^{\text{відн}}$	1	0	0	2	1	2	0	1	1
Послідовність символів $\hat{q}_k^{\text{відн}}$	0	3	3	1	0	1	3	0	0
Послідовність символів \hat{q}_k		3	0	2	3	1	2	1	0
Послідовність прийнятих біт		01	00	11	01	10	11	10	00

2.7 Припустимо, що через дію завад демодулятор ФМ-М виносить помилкове рішення на k -му тактовому інтервалі. Кожний символ, що надходить на вхід відносного декодера, при декодуванні використовується двічі – на k -му і на $(k + 1)$ -му тактових інтервалах. Тому, якщо рішення демодулятора на $(k - 1)$ -му і на $(k + 1)$ -му тактових інтервалах вірні, то на виході відносного декодера з'явиться два помилкових символи. Отже, відносний декодер множить помилки.

3 Ключові питання

3.1 З якою метою використовуються відносні методи передавання?

3.2 Пояснити правила відносного кодування і декодування двійкових символів.

3.3 Пояснити правила відносного кодування і декодування четвіркових символів.

3.4 Пояснити принцип побудови модулятора і демодулятора ВФМ-2.

3.5 Пояснити принцип побудови модулятора і демодулятора ВФМ- M ($M > 2$).

3.6 Як перетворюються помилкові символи при відносному декодуванні?

4 Домашнє завдання

4.1 Вивчити розділ “Відносне кодування і декодування” за конспектом лекцій і літературою [1, с. 106-108].

4.2 Записати число $896 + N$ у двійковій системі числення (N – номер Вашої бригади).

4.3 Виконати кодування і декодування отриманого в 4.2 цифрового сигналу відносним двійковим кодом, поклавши $b_0^{\text{відн}} = 0$ і $p = 0$. Результати оформити у вигляді таблиці, взявши за взірець табл. 1.

4.4 Виконати кодування і декодування отриманого в 4.2 цифрового сигналу четвірковим маніпуляційним кодом Грея, а потім – відносним четвірковим кодом, поклавши $q_0^{\text{відн}} = 0$. Виконати відносне декодування при $p = 0$ і маніпуляційне декодування. Результати оформити у вигляді таблиці, взявши за взірець табл. 5.

4.5 Підготуватись до обговорення за ключовими питаннями.

5 Лабораторне завдання

5.1 Дослідити двійкове відносне кодування і декодування. Для цього необхідно запустити програму **ба**, використовуючи іконку “Лабораторні роботи” на робочому столі, а потім папку “УПОС”, і вивчити схему макета; потім установити:

- цифровий сигнал, що використаний при виконанні домашнього завдання;
- початковий стан відносного кодера $b_0^{\text{відн}} = 0$;
- режим передавання каналом зв’язку “Без помилок”.

Запустити програму на виконання. Якщо зсув у каналі зв’язку $p = 1$, то повторно запустити програму на виконання ще один раз чи більше, доки не буде отримано $p = 0$. Записати послідовності цифрових сигналів, заповнюючи таблицю виду табл. 1. Порівняти з результатами домашнього завдання.

5.2 Дослідити двійкове відносне кодування і декодування при початковому стані відносного кодера $b_0^{\text{відн}} = 1$. Інші умови виконання завдання ті ж, що і в 5.1. Після виконання програми з $p = 0$ записати послідовності цифрових сигналів, заповнюючи таблицю виду табл. 1. Порівняти з результатами виконання 5.1 і зробити висновки.

5.3 Дослідити двійкове відносне декодування при зсуві в каналі $p = 1$. Стан $b_0^{\text{відн}}$ будь-який, режим передавання каналом зв’язку “Без помилок”. Програму запускати на виконання до тих пір, доки не буде отримано $p = 1$. Записати послідовності цифрових сигналів, заповнюючи таблицю виду табл. 1. Порівняти з результатами виконання 5.1 та 5.2 і зробити висновки.

5.4 Дослідити двійкове відносне декодування в режимі передавання каналом зв’язку “З помилкою”. Зсув в каналі p і стан $b_0^{\text{відн}}$ довільні. Після виконання програми записати послідовності цифрових сигналів, заповнюючи таблицю виду табл. 1. Проаналізувати результати, звертаючи увагу на розмноження помилок під час декодування.

5.5 Дослідити чотирикове відносне кодування і декодування. Для цього необхідно запустити програму **бб**, використовуючи іконку “Лабораторні роботи” на робочому столі, а потім папку “УПОС”, і вивчити схему макета; потім установити:

- цифровий сигнал, що використаний при виконанні домашнього завдання;
- початковий стан відносного кодера $q_0^{\text{відн}} = 0$;
- режим передавання каналом зв’язку “Без помилок”.

Запустити програму на виконання. Якщо зсув у каналі зв’язку $p \neq 0$, то повторно запустити програму на виконання ще один раз чи більше, доки не буде отримано $p = 0$. Записати послідовності цифрових сигналів, заповнюючи таблицю виду табл. 5. Порівняти з результатами домашнього завдання.

5.6 Дослідити четвіркове відносне кодування і декодування при початковому стані відносного кодера $q_0^{\text{відн}} \neq 0$. Інші умови виконання завдання ті ж, що і

в 5.1. Після виконання програми з $p = 0$ записати послідовності цифрових сигналів, заповнюючи таблицю виду табл. 5. Порівняти з результатами виконання 5.5 і зробити висновки.

5.7 Дослідити четвіркове відносне декодування при зсуві в каналі $p \neq 0$. Стан $q_0^{\text{відн}}$ довільний, режим передавання каналом зв'язку “Без помилок”. Програму запускають на виконання до тих пір, доки не буде отримано $p \neq 0$. Записати послідовності цифрових сигналів, заповнюючи таблицю виду табл. 5. Порівняти з результатами виконання 5.5 та 5.6 і зробити висновки.

5.8 Дослідити четвіркове відносне декодування в режимі передавання каналом зв'язку “З помилкою”. Зсув в каналі p і стан $q_0^{\text{відн}}$ довільні. Після виконання програми записати послідовності цифрових сигналів, заповнюючи таблицю виду табл. 5. Проаналізувати результати, звертаючи увагу на розмноження помилок під час декодування.

6 Опис лабораторного макета

Лабораторна робота виконується на комп'ютері в середовищі HP VEE з використанням двох віртуальних макетів.

Макет **6а** (рис. 3) призначено для вивчення двійкового відносного кодування й декодування і містить:

- генератор цифрового сигналу, що складається з 10 двійкових символів, символи встановлюються на панелі макета;
- відносний кодер, що працює за правилом (3), на панелі макета встановлюється $b_0^{\text{відн}}$;
- двійковий канал з невизначеністю другого порядку (тобто модель каналу зв'язку з ФМ-2); зсув p набуває значення 0 і 1 випадково; можна встановити передавання каналом без помилок або з помилкою; якщо встановити режим передавання з помилкою, то помилка виникає випадково в одному з символів, при цьому індикатор вказує номер помилкового символу;
- відносний декодер, що працює за правилом (4).

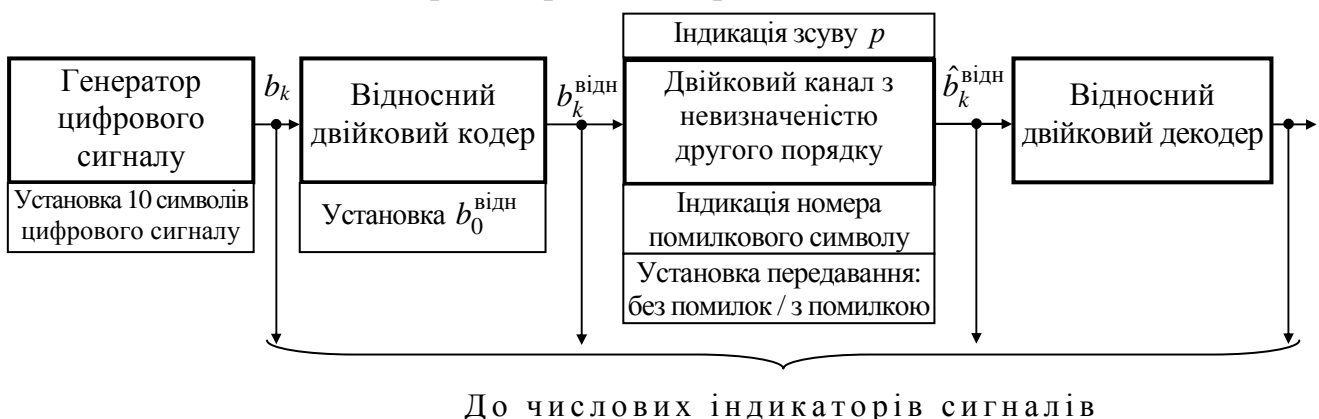


Рисунок 3 – Схема макета для вивчення двійкового відносного кодування

Макет **6б** (рис. 4) призначено для вивчення чотирикового відносного кодування та декодування й містить:

- генератор цифрового сигналу, що складається з 10 двійкових символів, символи встановлюються на панелі макета;
- кодер маніпуляційного коду, що працює відповідно табл. 4;
- відносний кодер, що працює за правилом (7), на панелі макета встановлюється $q_0^{\text{відн}}$;
- четвірковий канал з невизначеністю четвертого порядку (тобто модель каналу зв'язку з ФМ-4); зсув p набуває значення 0, 1, 2 і 3 випадково; можна встановити передавання каналом без помилок чи з помилкою; якщо встановити режим передавання з помилкою, то помилка виникає випадково в одному з символів, при цьому індикатор вказує номер помилкового символу;
- відносний декодер, що працює за правилом (8);
- декодер маніпуляційного коду, що працює у відповідності з табл. 4.



Рисунок 4 – Схема макета для вивчення четвіркового відносного кодування

7 Вимоги до звіту

7.1 **Назва** лабораторної роботи.

7.2 **Мета** роботи.

7.3 **Результати** виконання домашнього завдання.

7.4 **Структурні схеми** досліджень та **результати** виконання пп. 5.1...5.8 лабораторного завдання (таблиці і пояснення до них).

7.5 **Висновки** за кожним пунктом завдання, в яких надати аналіз отриманих результатів (збіг експериментальних та теоретичних даних).

7.6 Дата, підпис студента, віза викладача з оцінкою за 100-бальною шкалою.

Література

1 **Банкет В.Л., Дорофеев В.М.** Цифровые методы в спутниковой связи. – М.: Радио и связь, 1988. – 240 с.

Лабораторна робота 7

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ОПТИМАЛЬНИХ ДЕМОДУЛЯТОРІВ СИГНАЛІВ ЦИФРОВИХ ВИДІВ МОДУЛЯЦІЇ

1 Мета роботи

1.1 Вивчення методики експериментального дослідження завадостійкості приймання сигналів цифрової модуляції.

1.2 Експериментальне дослідження завадостійкості приймання сигналів АМ-2, ЧМ-2, ФМ-2, ВФМ-2 і ФМ-4.

2 Ключові положення

2.1 На вхід демодулятора надходить сума переданого модульованого сигналу $s(t)$ і завади $n(t)$: $z(t) = s(t) + n(t)$. За сигналом $z(t)$ демодулятор повинен відновити цифровий сигнал. Сигнал цифрової модуляції $s(t)$ – це послідовність імпульсних елементарних сигналів, що відображають цифровий сигнал і йдуть через тактовий інтервал T :

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s_i^{(k)}(t - kT), \quad (1)$$

де $s_i(t)$, $i = 0, \dots, M - 1$ – елементарні сигнали (імпульси);

M – число елементарних сигналів;

$s_i^{(k)}(t - kT)$ – i -й імпульс, що передається на k -му тактовому інтервалі.

Демодулятор на кожному тактовому інтервалі виносить рішення про номер переданого елементарного сигналу і видає набір із $n = \log_2 M$ біт, що відповідають сигналу з цим номером. Критерієм оптимальності демодулятора є мінімум імовірності помилки двійкового символу цифрового сигналу.

2.2 Оптимальний демодулятор реалізує потенціальну завадостійкість елементарних сигналів, що використовуються. Потенціальна завадостійкість довільних двійкових рівноймовірних сигналів за умови, що завада $n(t)$ – білий гауссів шум, виражається формулою для ймовірності помилки сигналу

$$P_{\text{пом}}(2) = V\left(\frac{d}{\sqrt{2N_0}}\right), \quad (2)$$

де d – віддаль між сигналами;

N_0 – питома потужність шуму;

$$V(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt - \quad (3)$$

інтеграл імовірності.

У двійкових системах передавання ймовірність помилки біта $p = P_{\text{пом}}(2)$.

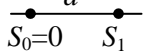
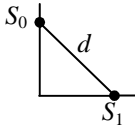
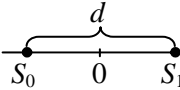
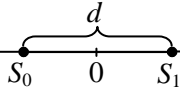
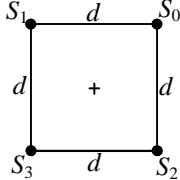
Функція $V(x)$ монотонно спадає. Тому, чим більший аргумент функції, тим менша ймовірність помилки. Цілком очевидно, що, чим менша питома потужність шуму N_0 , тим менша ймовірність помилки. Зростання відстані між сигналами d приводить до зменшення ймовірності помилки. Значення d визначається із сигнального сузір'я модульованого сигналу і виражається через енер-

гію сигналу, що витрачається на передавання одного біта E_6 . Енергію на біт можна виразити через середню потужність сигналу P_s і тривалість біта T_6 або швидкість цифрового сигналу R , що передається:

$$E_6 = P_s \cdot T_6 = P_s / R. \quad (4)$$

2.3 У разі багатопозиційних сигналів ($M > 2$) імовірність помилки сигналу виражають сумою ймовірностей помилки в двійкових системах, утворених елементарним сигналом, що розглядається, і сигналами, переходи в які найбільш імовірні. Отже, і у разі багатопозиційних сигналів імовірність помилки сигналу залежить від N_0 і d . Перерахунок імовірності помилки сигналу в імовірність помилки біта проводиться з урахуванням маніпуляційного коду. У табл. 1 для методів модуляції, що розглядаються в лабораторній роботі наведені: сигнальні сузір'я, відстані між сигналами і вирази для ймовірності помилки біта. Для компактного запису формул імовірності помилки біта введено позначення $h_6^2 = E_6 / N_0$ – відношення енергії, що витрачається на передавання одного біта, до питомої потужності шуму (коротко – відношення сигнал/шум). Формула ймовірності помилки біта при ВФМ-2 записана з урахуванням того, що при відносному декодуванні кількість помилок подвоюється: $p_{\text{ВФМ-2}} = 2p_{\text{ФМ-2}}$, що вірно, коли $p_{\text{ФМ-2}} \ll 1$.

Таблиця 1 – Характеристики сигналів, що визначають їх завадостійкість

Метод модуляції	АМ-2	ЧМ-2	ФМ-2	ВФМ-2	ФМ-4
Сигнальне сузір'я					
Віддаль між сигналами d	$\sqrt{2E_6}$	$\sqrt{2E_6}$	$2\sqrt{E_6}$	$2\sqrt{E_6}$	$2\sqrt{E_6}$
Імовірність помилки біта p	$V(h_6)$	$V(h_6)$	$V(\sqrt{2}h_6)$	$2V(\sqrt{2}h_6)$	$V(\sqrt{2}h_6)$

2.4 Для зручності визначення ймовірності помилки біта p при заданому відношенні сигнал/шум h_6^2 або необхідного відношення сигнал/шум при заданій ймовірності помилки біта будують залежність $p = f(h_6^2)$, взірець якої наведено на рис. 1. Під час побудови графіка значення відношення сигнал/шум прийнято виражати в децибелах і використовувати для них лінійний масштаб. Слід пам'ятати, що у формулах для ймовірності помилки величина h_6 входить у разах. Переходи виконують за формулами

$$\left. \begin{aligned} h_6^2 [\text{дБ}] &= 10 \lg h_6^2 [\text{раз}], \\ h_6^2 [\text{раз}] &= 10^{0,1 h_6^2 [\text{дБ}]} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Під час розрахунків імовірності помилки, що виражається через інтеграл імовірності (3), використовують наближену формулу

$$V(x) = 0,65 \exp(-0,44(x + 0,75)^2). \quad (6)$$

Графіки залежності ймовірності помилки біта від відношення сигнал/шум $p = f(h_0^2)$ будують з використанням логарифмічного масштабу для ймовірності помилки p (рис.1).

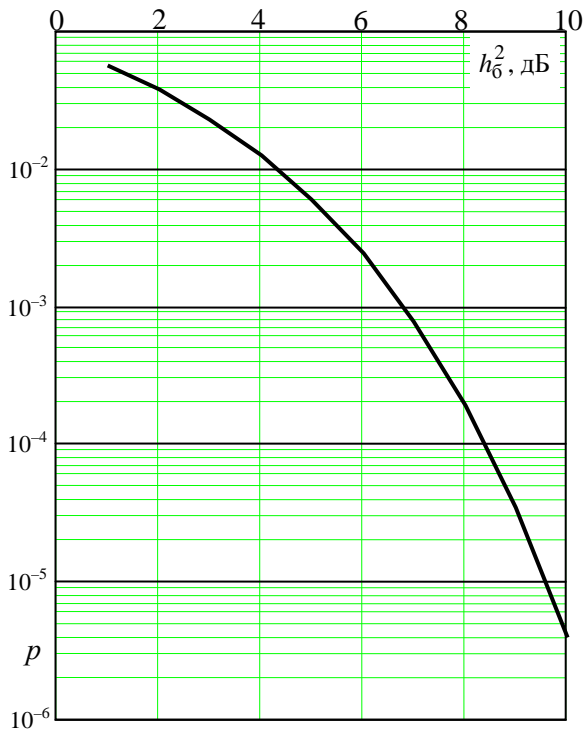


Рисунок 1 – Вірєць побудови графіка залежності $p = f(h_0^2)$

2.6 Відношення сигнал/шум з урахуванням співвідношення (4) можна подати як

$$h_0^2 = \frac{E_0}{N_0} = \frac{P_s T_0}{P_n / F_k} = \frac{P_s}{P_n} \cdot \frac{F_k}{R}, \quad (9)$$

де P_s і P_n – середні потужності сигналу і шуму на вході демодулятора;

F_k – ширина спектра шуму, яка дорівнює ширині смуги частот каналу зв'язку.

Отже, для вимірювання відношення сигнал/шум необхідно вимірити потужність сигналу і шуму квадратичним вольтметром і виконати обчислення за формулою (9) при відомих величинах F_k (Гц) и R (біт/с).

2.7 Смуга частот каналу зв'язку F_k повинна бути узгоджена з шириною спектра сигналу F_s : $F_k \geq F_s$. Ширина спектра (Гц) сигналів цифрових видів модуляції визначається:

$$\text{у разі ФМ-М, ВФМ-М і АМ-2 } F_s = \frac{R \cdot (1 + \alpha)}{\log_2 M}, \quad \text{у разі ЧМ-2 } F_s = 2R \cdot (1 + \alpha), \quad (10)$$

де α – коефіцієнт закруглення спектра, $0 \leq \alpha \leq 1$, типові значення $\alpha = 0,15 \dots 0,35$;

R – швидкість цифрового сигналу (біт/с);

M – число позицій модульованого сигналу.

2.5 Експериментально визначається відносна частота помилок, яку коротко називають частотою помилок або коефіцієнтом помилок

$$K_{\text{пом}} = N_{\text{пом}} / N_{\text{заг}}, \quad (7)$$

де $N_{\text{заг}}$ – число символів, переданих за час спостереження $T_{\text{сп}}$;

$N_{\text{пом}}$ – число помилково прийнятих символів за час T_c .

Ймовірність помилки і коефіцієнт помилок збігаються при нескінченно значному числі іспитів

$$p = \lim_{N_{\text{заг}} \rightarrow \infty} K_{\text{пом}}. \quad (8)$$

Час спостереження (чи $N_{\text{заг}}$) вибирається досить великим, щоб коефіцієнт помилок практично давав значення ймовірності помилки. Вважають, що таке наближення має місце при $N_{\text{пом}} \geq 20$.

3 Ключові питання

3.1 Що таке частота помилок, коефіцієнт помилок, ймовірність помилки?

3.2 Що таке потенціальна завадостійкість сигналів?

3.3 Записати і пояснити вирази для обчислення ймовірності помилки при оптимальному прийманні сигналів АМ-2, ЧМ-2, ФМ-2, ВФМ-2 і ФМ-4.

3.4 Пояснити, як залежить ймовірності помилки від швидкості цифрового сигналу при фіксованих значеннях P_s і N_0 .

3.5 Порівняти завадостійкість оптимального приймання сигналів АМ-2, ЧМ-2, ФМ-2, ВФМ-2 і ФМ-4 при фіксованому значенні h_0^2 .

3.6 Що є кількісною мірою розрізнення сигналів? Порівняти розрізнення сигналів АМ-2, ЧМ-2, ФМ-2, ВФМ-2 і ФМ-4.

3.7 Як розрахувати необхідну смугу частот каналу зв'язку для сигналів АМ-2, ЧМ-2, ФМ-2, ВФМ-2 і ФМ-4?

3.8 Як експериментально виміряти відношення сигнал/шум h_0^2 ?

4 Домашнє завдання

4.1 Вивчити розділ “Потенційна завадостійкість сигналів цифрових методів модуляції” за конспектом лекцій і літературою [1, с. 181...187; 2, с. 248...250].

4.2 Розрахувати таблицю значень ймовірності помилки біта для сигналів АМ-2, ЧМ-2, ФМ-2, ВФМ-2 і ФМ-4, змінюючи значення h_0^2 в діапазоні від 2 до 10 дБ з кроком 1 дБ. Побудувати в робочому зошиті графіки залежності p від відношення сигнал/шум h_0^2 . Графіки оформити на зразок рис. 1. Для такого рисунку відвести одну сторінку в зошиті.

4.3 Підготуватись до обговорення за ключовими питаннями.

5 Лабораторне завдання

5.1 Запустити програму 7, використовуючи іконку “Лабораторні роботи” на робочому столі, а потім папку “УПОС”, і вивчити схему макета.

5.2 Виконати калібрування відношення сигнал/шум у такій послідовності.

1) Виміряти середню потужність сигналу. Для цього необхідно установити:

- швидкість цифрового сигналу $R = 2400 \cdot N$, біт/с, де N – номер бригади;
- метод модуляції довільний;
- сигнал “Увімкнено”;
- смуга частот каналу зв'язку установлюється за умови $F_k \geq F_s$, а ширина спектра сигналу F_s визначається співвідношенням (10);
- шум “Вимкнено”;
- вимірювання “Середньої потужності”.

Запустити на виконання програму й записати вимірне значення середньої потужності сигналу P_s .

2) Розрахувати й установити значення питомої потужності шуму N_0 , за якого відношення сигнал/шум $h_0^2 = 1$, тобто 0 дБ. Для цього, виходячи з визна-

чення $h_6^2 = \frac{E_6}{N_0} = \frac{P_s T_6}{N_0} = \frac{P_s}{N_0 \cdot R}$, розраховується $N_0 = P_s/R$. При установці значення N_0 використовувати символ m для 10^{-3} і μ для 10^{-6} .

Вимкнути сигнал, установити ослаблення атенюатора шуму 0 дБ, запустити на виконання програму і записати вимірне значення середньої потужності шуму P_n . Упевнитись, що $P_n = F_k \cdot N_0$. У подальших вимірюваннях імовірності помилки установки R і N_0 не змінювати, а відношення сигнал/шум h_6^2 змінювати шляхом установки відповідного ослаблення атенюатора шуму: ослаблення шуму, подане в децибелах, задає точно таке значення відношення сигнал/шум h_6^2 в децибелах.

5.3 Виконати вимірювання ймовірності помилки. Для цього установити:

- вимірювання “Коефіцієнта помилок”;
- сигнал “Увімкнено”;
- метод модуляції АМ-2;
- смуга частот каналу зв’язку установлюється за умови $F_k \geq F_s$, а ширина спектра сигналу F_s визначається співвідношенням (10).

Скласти таблицю на зразок табл. 2. Установлюючи ослаблення атенюатора шуму від 3 до 9 дБ з кроком 1 дБ і запускаючи програму на виконання, заповнити колонки таблиці: метод модуляції, відношення сигнал/шум h_6^2 , число помилкових символів $N_{\text{пом}}$, число переданих символів $N_{\text{заг}}$. Повне виконання програми забезпечує $N_{\text{заг}} = 10000$. Виконання програми можна припинити вручну, якщо число помилкових символів досягло кількох десятків.

Таблиця 2 – Результати вимірювань імовірності помилки

Метод модуляції	Смуга частот каналу зв’язку, F_k , Гц	Відношення сигнал / шум h_6^2 , дБ	Число помилкових символів $N_{\text{пом}}$	Число переданих символів $N_{\text{заг}}$	Імовірність помилки p
АМ-2		3			
		4			
		⋮			
ЧМ-2		3			
		⋮			

Установити метод модуляції ЧМ-2 і повторити вимірювання.

Потім повторити вимірювання для методів модуляції ФМ-2, ВФМ-2 і ФМ-4 для значень відношення сигнал/шум від 2 до 6 дБ з кроком 1 дБ.

За результатами вимірювань розрахувати значення коефіцієнта помилок – співвідношення (7); вважаючи, що число іспитів $N_{\text{заг}}$ достатньо велике, розраховане значення коефіцієнта помилок прийняти як імовірність помилки p .

Побудувати графіки залежностей $p = f(h_6^2)$ за результатами вимірювань і обчислень для всіх методів модуляції. Графіки побудувати на тому ж рисунку, де наведені графіки, розраховані в домашньому завданні.

5.4 Виміряти ймовірність помилки при змінній смузі частот каналу зв’язку. Установити смугу частот каналу зв’язку, збільшивши її в 1,5...2 рази, і

повторити вимірювання ймовірності помилки для одного із видів модуляції. Впевнитись, що ймовірність помилки не залежить від смуги частот каналу зв'язку й безпосередньо від значення середньої потужності шуму на вході демодулятора – залежить від питомої потужності шуму N_0 .

6 Опис лабораторного макета

Лабораторна робота виконується на комп'ютері в середовищі HP VEE з використанням віртуального макета, структурну схему якого наведено на рис. 2. Він містить:

- джерело цифрового сигналу, що виробляє рівноймовірні символи 1 і 0, швидкість цифрового сигналу, біт/с, встановлюється на панелі макета;
- модулятор, що дозволяє формувати сигнали АМ-2, ЧМ-2, ФМ-2, ВФМ-2 і ФМ-4, середня потужність сигналу при всіх методах модуляції $P_s = 1 \text{ В}^2$, метод модуляції встановлюється на панелі макета;
- тумблер в колі модульованого сигналу дозволяє підімкнути вихід модулятора до входу каналу зв'язку або відімкнути;
- генератор шуму, що виробляє реалізації білого шуму з гауссовим розподілом імовірностей, значення питомої потужності N_0 встановлюється на панелі макета;
- атенюатор для ослаблення шуму, що поступає від генератора шуму; на панелі макета можна встановити ослаблення від 0 до 10 дБ з кроком 1 дБ або шум вимкнути;
- канал зв'язку, що формує суму сигналу і шуму, на панелі макета встановлюється смуга частот каналу зв'язку F_k , Гц;
- вимірювач середньої потужності, підімкнений до виходу каналу зв'язку;
- демодулятор, що призначений для демодуляції сигналів АМ-2, ЧМ-2, ФМ-2, ВФМ-2 і ФМ-4, виконує оптимальну демодуляцію сигналу, що поступає з каналу зв'язку, при зміні установки методу модуляції в модуляторі відповідним чином змінюється алгоритм демодуляції;
- схему порівняння символів, що поступають на вхід модулятора і йдуть з виходу демодулятора, у разі їх розбіжності формується сигнал про виникнення помилки під час демодуляції;
- лічильник числа помилкових символів $N_{\text{пом}}$, що підраховує кількість помилок, які виникли;
- лічильник числа переданих символів $N_{\text{заг}}$;
- числові індикатори вимірюної середньої потужності на виході каналу зв'язку, числа помилкових символів $N_{\text{пом}}$ і числа переданих символів $N_{\text{заг}}$.

У програму закладено, що її виконання закінчується після досягнення числа переданих символів $N_{\text{заг}} = 10000$. Якщо число помилкових символів недостатнє для розрахунку ймовірності помилок, то виконують повторний запуск програми (ще декілька разів), а для розрахунку ймовірності помилок підсумовують відповідні числа $N_{\text{заг}}$ и $N_{\text{пом}}$.

7 Вимоги до звіту

7.1 **Назва** лабораторної роботи.

7.2 **Мета** роботи.

7.3 **Результати** виконання домашнього завдання.

7.4 **Структурна схема** досліджень та **результати** виконання пп. 5.2...5.4 лабораторного завдання (таблиці і графіки).

7.5 **Висновки** за кожним пунктом завдання, в яких надати аналіз отриманих результатів (збіг експериментальних та теоретичних даних).

7.6 Дата, підпис студента, віза викладача з оцінкою за 100-бальною шкалою.

Література

1 **Теория передачи сигналов.** Учебник для вузов / А. Г. Зюко и др. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.

2 **Панфілов І. П., Дирда В. Ю., Капацін А. В.** Теорія електричного зв'язку: Підручник для студентів вузів 1-го та 2-го рівнів акредитації. – К.: Техніка, 1988. – 328 с.

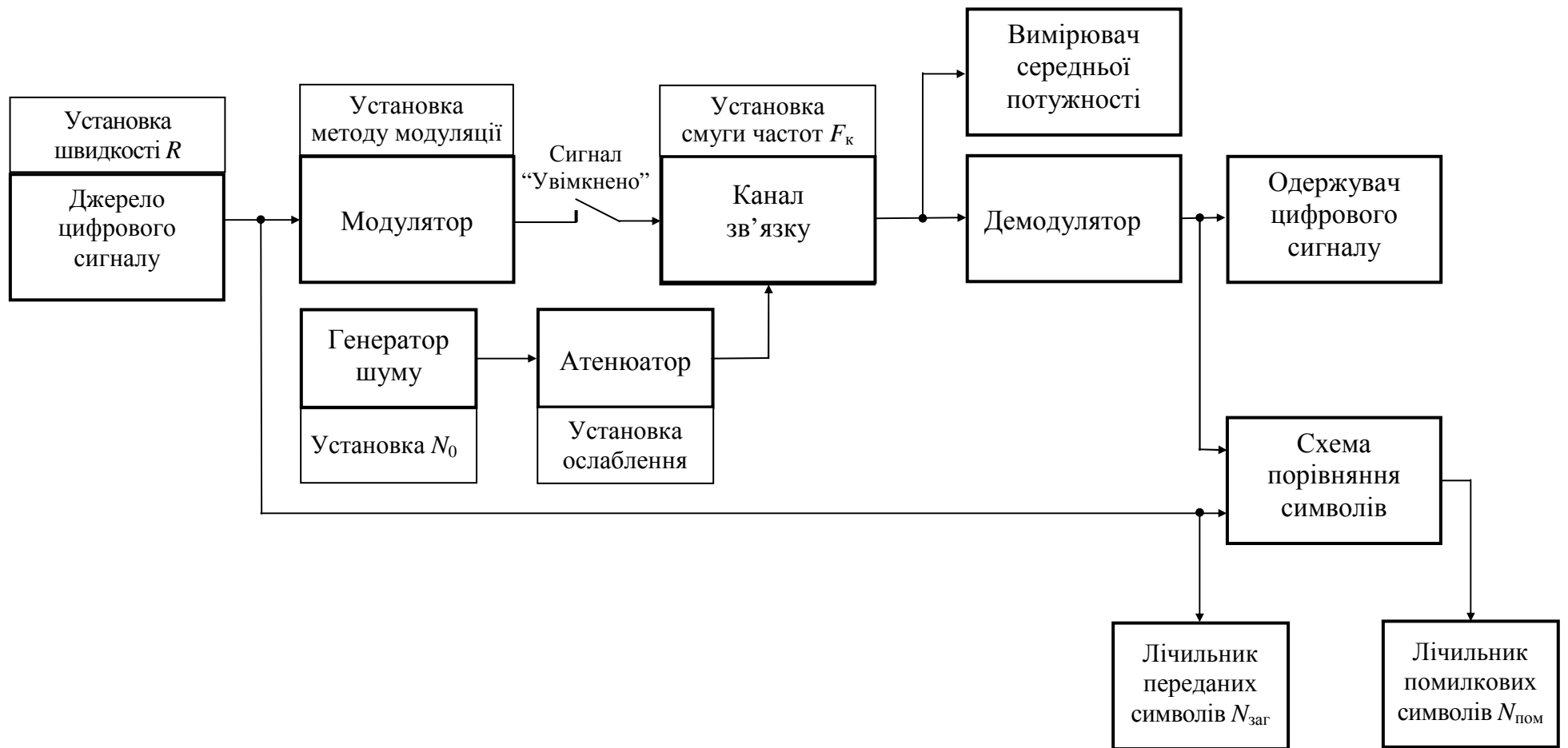


Рисунок 2 – Структурна схема макета лабораторної роботи

Лабораторна робота 8 ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕМОДУЛЯТОРА СИГНАЛУ АНАЛОГОВОЇ ЧМ

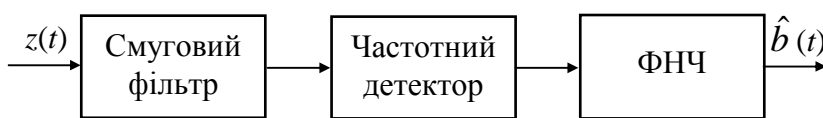
1 Мета роботи

1.1 Дослідження впливу гармонічної завади на демодуляцію сигналу аналогової ЧМ.

1.2 Дослідження впливу адитивного білого гауссового шуму (АБГШ) на демодуляцію сигналу аналогової ЧМ.

2 Ключові положення

2.1 В процесі демодуляції сигналу ЧМ необхідно відновити первинний (модулюючий) сигнал. Схему демодулятора сигналу аналогової ЧМ, яка отримала назву “стандартний частотний детектор”, наведено на рис. 1. На вхід демодулятора надходить су-



ма модульованого сигналу і завади $z(t) = s_{\text{ЧМ}}(t) + n(t)$. Смуговий фільтр має смугу пропускання, яка дорівнює

Рисунок 1 – Схема демодулятора сигналу ЧМ

ширині спектра сигналу ЧМ $F_{\text{ЧМ}}$. Частотний детектор (ЧД) повинен мати лінійну детекторну характеристику в інтервалі частот $(f_0 - \Delta f_d, f_0 + \Delta f_d)$, де f_0 – частота несінного колювання, Δf_d – девіація частоти сигналу ЧМ. Тоді напруга на виході ЧД буде пропорційна миттєвій частоті сигналу на його вході. ФНЧ має частоту зрізу, яка дорівнює максимальній частоті в спектрі первинного сигналу F_{max} . При аналоговій реалізації ЧД схеми виконують на основі коливальних контурів для перетворення змін частоти в зміни амплітуди колювань та амплітудних детекторів. Цифрова реалізація ЧД (рис. 2) основана на квадратурному представленні ЧМ сигналу:

$$s_{\text{ЧМ}}(t) = A_0 \cos\left(2\pi\Delta f_d \int_{-\infty}^t b(t) dt\right) \cos(2\pi f_0 t) - A_0 \sin\left(2\pi\Delta f_d \int_{-\infty}^t b(t) dt\right) \sin(2\pi f_0 t). \quad (1)$$

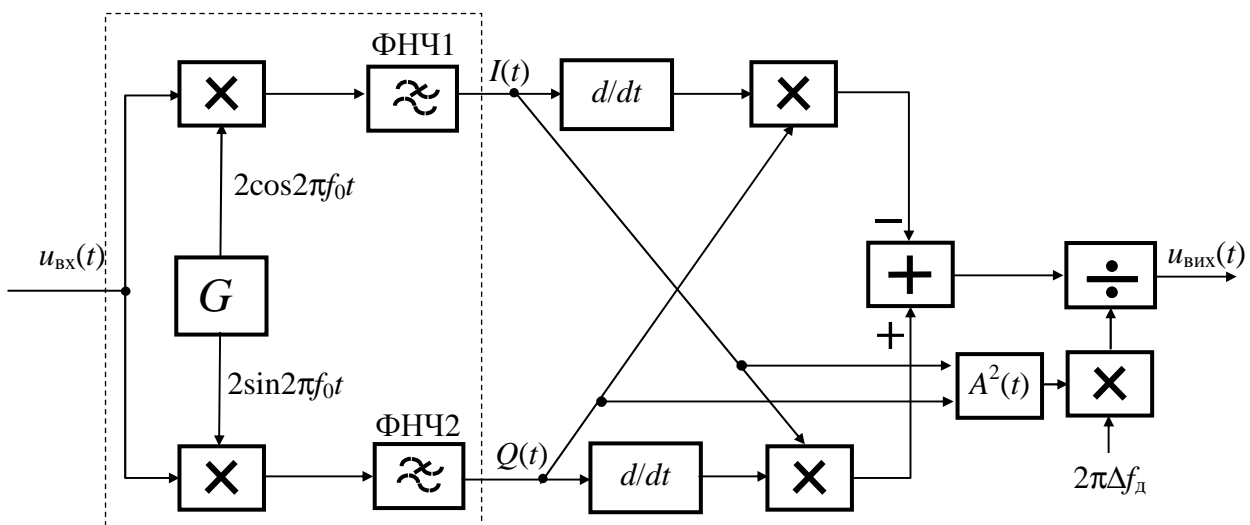


Рисунок 2 – Схема частотного детектора

Приріст фази сигналу (1):

$$\varphi(t) = \operatorname{arctg} \frac{Q(t)}{I(t)}, \quad (2)$$

де $Q(t) = A_0 \sin \left(2\pi\Delta f_{\text{д}} \int_{-\infty}^t b(t) dt \right)$ – квадратурна складова;

$I(t) = A_0 \cos \left(2\pi\Delta f_{\text{д}} \int_{-\infty}^t b(t) dt \right)$ – синфазна складова.

У результаті сигнал на виході детектора:

$$\hat{b}(t) = f(t) = \frac{1}{2\pi\Delta f_{\text{д}}} \varphi'(t) = \frac{1}{2\pi\Delta f_{\text{д}}} \frac{I(t)Q'(t) - Q(t)I'(t)}{A^2(t)}, \quad (3)$$

де $A(t)$ – обвідна сигналу, що детектується.

Для виділення синфазної і квадратурної складових у схемі ЧД використовується квадратурний розщеплювач, який на рис. 2 обведено пунктирною лінією.

2.2 Нехай на вхід демодулятора надходить сума модульованого сигналу $s_{\text{ЧМ}}(t)$ і гармонічної завади

$$s_3(t) = A_3 \cos 2\pi f_3 t = A_3 \cos(2\pi(f_0 + \Delta f_3)t), \quad (4)$$

де A_3 – амплітуда гармонічної завади;

f_3 – частота гармонічної завади;

Δf_3 – різниця частот гармонічної завади і частоти несівної ЧМ сигналу.

Аналіз впливу гармонічної завади на процес демодуляції ЧМ сигналу просто провести для випадку немодульованої несівної. Суму немодульованої несівної і гармонічної завади можна записати наступним чином:

$$\begin{aligned} z(t) &= A_0 \cos 2\pi f_0 t + A_3 \cos 2\pi f_3 t = \\ &= (A_0 + A_3 \cos 2\pi\Delta f_3 t) \cos 2\pi f_0 t - A_3 \sin 2\pi\Delta f_3 t \sin 2\pi f_0 t. \end{aligned} \quad (5)$$

Виділяючи у виразі (5) синфазну і квадратурну складові і підставляючи їх у вираз (3), можна визначити напругу на виході демодулятора (вважаємо, що Δf_3 менша за частоту зрізу ФНЧ)

$$\hat{b}(t) = \frac{\Delta f_3}{\Delta f_{\text{д}}} \cdot \frac{\frac{1}{\sqrt{\rho}} + \cos 2\pi\Delta f_3 t}{\sqrt{\rho} + \frac{1}{\sqrt{\rho}} + 2\cos 2\pi\Delta f_3 t}, \quad (6)$$

де $\rho = \frac{A_0^2}{A_3^2}$ – відношення середніх потужностей сигналу і завади.

Розглянемо значення (6) у моменти часу t_k , коли $\cos 2\pi\Delta f_3 t_k = -1$,

$$t_k = \frac{k}{2\Delta f_3}; \quad k = 1, 3, 5, \dots; \quad (7)$$

$$\hat{b}(t_k) = \frac{\Delta f_3}{\Delta f_d} \cdot \frac{1/\sqrt{\rho} - 1}{\sqrt{\rho} + 1/\sqrt{\rho} - 2} = \frac{\Delta f_3}{\Delta f_d} \cdot \frac{1 - \sqrt{\rho}}{\rho - 2\sqrt{\rho} + 1} = \frac{\Delta f_3}{\Delta f_d} \cdot \frac{1}{1 - \sqrt{\rho}}. \quad (8)$$

Якщо $\rho \rightarrow 1$, то $\hat{b}(t_k) \rightarrow \infty$, і на виході демодулятора спостерігаються так звані викиди частоти у вигляді досить коротких імпульсів (рис. 3).

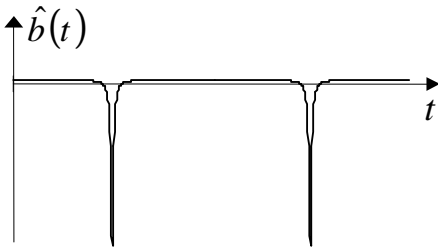


Рисунок 3 – Викиди на виході ЧД при дії гармонічної завади ($f_3 < f_0$)

Як впливає із співвідношення (6), коли $\rho \gg 1$ або $\rho \ll 1$, на виході демодулятора спостерігається постійна напруга плюс гармонічне коливання частоти Δf_3 .

2.3 Нехай на демодулятор діє сума корисного сигналу $s_{\text{ЧМ}}(t)$ і АБГШ. Важливою характеристикою будь-якого демодулятора аналогових видів модуляції є залежність відношення середніх потужностей сигналу і шуму на виході демодулятора $\rho_{\text{вих}}$ від відношення середніх потужностей сигналу і шуму на вході демодулятора $\rho_{\text{вх}}$. Для стандартного частотного детектора ця залежність має вигляд

$$\rho_{\text{вих}} = \frac{6m_{\text{ЧМ}}^2(m_{\text{ЧМ}} + 1)}{K_a^2} \cdot \frac{\rho_{\text{вх}}}{1 + 4m_{\text{ЧМ}}^2 \exp(-\rho_{\text{вх}}) \sqrt{3\rho_{\text{вх}}(1 + 6\rho_{\text{вх}}/K_a^2)}/\pi}, \quad (9)$$

де $m_{\text{ЧМ}} = \Delta f_d / F_{\text{max}}$ – індекс частотної модуляції;

F_{max} – максимальна частота у спектрі модулюючого сигналу;

K_a – коефіцієнт амплітуди модулюючого сигналу $b(t)$ – відношення максимального значення сигналу до кореня квадратного з його середньої потужності $b_{\text{max}} / \sqrt{P_b}$; у гармонічного коливання $K_a = \sqrt{2}$.

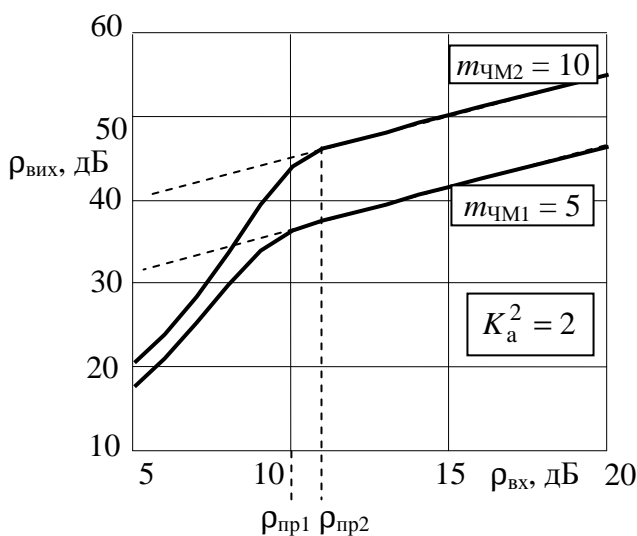


Рисунок 4 – Завадостійкість демодулятора сигналу ЧМ

Залежність (9) зображують графічно, при цьому значення $\rho_{\text{вих}}$ і $\rho_{\text{вх}}$ подають у децибелах (рис. 4). Зручно користуватись поняттям виграш демодулятора у відношенні сигнал/шум:

$$g = \frac{\rho_{\text{вих}}}{\rho_{\text{вх}}}. \quad (10)$$

Величина виграшу g характеризує завадостійкість демодулятора, тобто його здатність протистояти дії завад. Важливо, щоб демодулятор забезпечував якомога більший виграш при дії АБГШ, оскільки цей вид завади завжди існує в системах зв'язку і створює найбільший вплив на якість

відновлення первинного сигналу. Для сигналу ЧМ характерно, що, коли відно-

шення сигнал/шум на вході демодулятора перевищує порогове відношення $\rho_{\text{пр}}$, то $\rho_{\text{вих}}$ лінійно залежить від $\rho_{\text{вх}}$, і демодулятор забезпечує великий виграш у відношенні сигнал/шум

$$g_{\text{ЧМ}} = \frac{\rho_{\text{вих}}}{\rho_{\text{вх}}} = \frac{6m_{\text{ЧМ}}^2 (m_{\text{ЧМ}} + 1)}{K_a^2} \quad (11)$$

(другий співмножник у формулі (9) практично дорівнює $\rho_{\text{вх}}$, коли $\rho_{\text{вх}} > \rho_{\text{пр}}$).

Коли відношення сигнал/шум на вході демодулятора $\rho_{\text{вх}}$ менше порогового відношення сигнал/шум $\rho_{\text{пр}}$, то виграш демодулятора різко зменшується (рис. 4). Таке явище різкого зменшення величини виграшу називають порогом завадостійкості приймання сигналу ЧМ.

Порогове відношення сигнал/шум $\rho_{\text{пр}}$ дещо залежить від значення $m_{\text{ЧМ}}$ (рис. 4). Вважають, що демодулятор за схемою стандартного частотного детектора характеризується орієнтовним значенням $\rho_{\text{пр}} = 10$.

Область значень $\rho_{\text{вх}}$, коли $\rho_{\text{вх}} < \rho_{\text{пр}}$, – це неробоча область. На виході демодулятора спостерігаються викиди частоти, подібні викидам частоти при дії гармонічної завади. Такий викид виникає, коли має місце фрагмент реалізації шуму (а це квазігармонічне коливання) з амплітудою, близькою до амплітуди сигналу ЧМ. Але, на відміну від гармонічної завади, у разі дії шуму моменти появи викидів та їх амплітуди випадкові. Як результат, сигнал на виході демодулятора спотворений короткими імпульсами. Під час приймання мовних або музикальних сигналів такі викиди сприймаються на слух як різкі щиглики, а під час приймання телевізійних сигналів – як точки на екрані.

Існують демодулятори сигналів ЧМ з пониженим значенням $\rho_{\text{пр}}$. У таких демодуляторів значення $\rho_{\text{пр}}$ на 3...5 дБ нижче, ніж у стандартного ЧД.

Форма спектра шуму на виході демодулятора залежить від того, в якій області працює демодулятор. Якщо $\rho_{\text{вх}} > \rho_{\text{пор}}$, то спектр має параболічну форму, тобто спектральна густина потужності шуму $G(f)$ пропорційна f^2 . Короткі імпульси в області, де $\rho_{\text{вх}} < \rho_{\text{пор}}$, дають внесок у спектр з рівномірним розподілом, і спектр стає більш рівномірним.

3 Ключові питання

3.1 Пояснити призначення демодулятора сигналу ЧМ та схему стандартного ЧД.

3.2 Пояснити схему ЧД з цифровою реалізацією.

3.3 За яких умов дія гармонічної завади на демодулятор сигналу ЧМ призводить до появи викидів на його виході?

3.4 Що спостерігається на виході демодулятора сигналу ЧМ під час дії гармонічної завади, якщо $\rho \gg 1$ або $\rho \ll 1$?

3.5 Дати визначення виграшу у відношенні сигнал/шум, що забезпечується демодулятором? Як розрахувати виграш, що забезпечується демодулятором сигналу ЧМ?

3.6 Пояснити, у чому полягає явище порогу завадостійкості приймання сигналу ЧМ.

3.7 Якого виду спотворення сигналу спостерігаються на виході демодулятора сигналу ЧМ, якщо $\rho_{\text{вх}} < \rho_{\text{пор}}$?

3.8 Яку форму має спектр шуму на виході демодулятора сигналу ЧМ залежно від відношення сигнал/шум на його вході?

4. Домашнє завдання

4.1 Вивчити розділ “Демодуляція сигналів аналогової ЧМ” по конспекту лекцій і літературі [1, с. 435...440; 2, с. 319...325].

4.2 Розрахувати ширину спектра ЧМ сигналу $F_{\text{ЧМ}} = 2F(m_{\text{ЧМ}} + 1)$ та ви-
граш, що забезпечує ЧД, якщо модулюючий сигнал – гармонічне коливання ча-
стоти F , а девіація частоти ЧМ сигналу $\Delta f_{\text{д}}$. Вихідні дані для розрахунку задані
в табл. 1 (N – номер бригади).

Таблиця 1 – Вихідні дані до виконання домашнього і лабораторного завдань

N	F , кГц	$\Delta f_{\text{д}}$, кГц	$A_{\text{з}}$, В	$f_{\text{з}}$, кГц
1	1	8	0,8	99,5
2	1,5	12	0,85	99
3	2	14	0,9	100,5
4	2,5	15	0,95	101
5	1	7	0,99	99,5
6	1,5	10	1,05	99
7	2	12	1,1	100,5
8	2,5	13	1,15	101
9	1	6	1,2	99,5
10	1,5	9	1,25	99

4.3 Побудувати графік залежності $\rho_{\text{вих}}$, дБ від $\rho_{\text{вх}}$, дБ для діапазону значення $\rho_{\text{вх}}$ від 5 до 20 дБ. Графік будується на повний аркуш зошита із зазначенням масштабів по осях. Переведення абсолютних значень у децибели виконується наступним чином: $\rho_{\text{вих, дБ}} = 10 \lg \rho_{\text{вих}}$. Вихідні дані для розрахунку задані в табл. 1.

4.4 Підготуватись до обговорення за ключовими питаннями.

5 Лабораторне завдання

5.1 Запустити програму 8, використовуючи іконку “Лабораторні роботи” на робочому столі, а потім папку “УПОС”, і вивчити схему макета.

5.2 Провести аналіз детектування частотно модульованого сигналу без завади. Установити значення частоти модулюючого коливання F і девіації частоти $\Delta f_{\text{д}}$ такі, як у домашньому завданні. Смуга пропускання смугового фільтра (СФ) установлюється такою, що дорівнює ширині спектра ЧМ сигналу $F_{\text{ЧМ}}$, яка була розрахована в домашньому завданні. Частоту зрізу ФНЧ установити такою самою, як частота F . Увімкнути модулюючий сигнал і вимкнути заваду. Після виконання програми переконатись, що сигнал на виході ЧД є гармонічним коливанням частоти F , амплітуди 1 В. Оцінити ширину спектра модульованого сигналу.

5.3 Дослідити ефект викидів частоти при дії на ЧД суми немодульованої несівної і гармонічної завади. Установити амплітуду A_3 і частоту f_3 гармонічної завади відповідно до табл. 1, частоту зрізу ФНЧ 50 кГц. Вимкнути модулюючий сигнал, увімкнути гармонічну заваду. Після виконання програми зарисувати часову діаграму на виході детектора й обґрунтувати параметри цього коливання.

5.4 Дослідити завадостійкість демодулятора по відношенню до гауссової завади. Установити значення частоти модулюючого коливання F і девіації частоти Δf_d такі, як у домашньому завданні. Смугу пропускання СФ установити такою, що дорівнює ширині спектра ЧМ сигналу, яка була розрахована в домашньому завданні: $\Delta F = F_{\text{ЧМ}}$. Частоту зрізу ФНЧ установити такою самою, як частота F . Увімкнути модулюючий сигнал і вимкнути заваду. Після виконання програми переконатись, що потужність сигналу на вході ЧД $P_s = 0,5 \text{ В}^2$ і на виході ФНЧ $P_c = 0,5 \text{ В}^2$.

Розрахувати питому потужність шуму від генератора гауссової завади $N_0 = P_s/\Delta F$ й установити отримане значення на панелі макета, використовуючи символ m для 10^{-3} і u для 10^{-6} . Вимкнути модулюючий сигнал, увімкнути гауссову заваду й установити ослаблення атенюатора 0 дБ. Після виконання програми впевнитись, що потужність на вході ЧД зросла вдвічі, тобто потужності сигналу і шуму збігаються. Якщо тепер установити певне ослаблення атенюатора, то точно таким буде відношення сигнал/шум на вході ЧД (в дБ).

Установлюючи ослаблення атенюатора у діапазоні від 5 до 20 дБ (це будуть значення $\rho_{\text{вх}}$), провести вимірювання значень потужності шуму на виході ФНЧ $P_{\text{ш}}$ і занести їх до таблиці. Розрахувати значення $\rho_{\text{вих, дБ}} = 10 \lg(P_c/P_{\text{ш}})$.

Побудувати графік $\rho_{\text{вих, дБ}} = f(\rho_{\text{вх, дБ}})$ на тому самому рисунку, де побудований графік за домашнім завданням. Указати на побудованих графіках значення порогових відношень сигнал/шум. Зробити висновки відносно того, в якій області вхідних відношень сигнал/шум повинен працювати ЧД.

5.5 Дослідити форму спектра шуму на виході ЧД. Залишити установки на макеті, що були в завданні 5.4. Установити ослаблення атенюатора 0 дБ і частоту зрізу ФНЧ 50 кГц. Зафіксувати в протоколі спектр шуму на виході ФНЧ. Установити ослаблення атенюатора 20 дБ і знову зафіксувати в протоколі спектр шуму на виході ФНЧ. Зробити висновок про залежність форми спектра шуму від відношення сигнал/шум на вході ЧД.

6 Опис лабораторного макета

Лабораторна робота виконується на комп'ютері в середовищі HP VEE з використанням віртуального макета, структурну схему якого наведено на рис. 2. Він містить:

- генератор гармонічного коливання, яке використовується як модулюючий сигнал, частота коливання установлюється на панелі макета, амплітуда 1 В;
- частотний модулятор, несівне коливання має частоту 100 кГц і амплітуду 1 В; девіація частоти установлюється на панелі макета; вимикач S1 дозволяє вимкнути модулюючий сигнал від входу модулятора;
- суматор для додавання до модульованого сигналу завади;

- генератор гармонічної завади, її амплітуда і частота установлюються на панелі макета;
- генератор гауссової завади, її спектральна густина потужності установлюється на панелі макета;
- атенюатор у колі гауссової завади, який дозволяє установлювати ослаблення з кроком 1 дБ у діапазоні значень від 0 до 20 дБ;
- перемикач $S2$ надає можливість вибрати вид завади або її вимкнути;
- смуговий фільтр призначено для обмеження спектра шуму; смуга пропускання фільтра установлюється на панелі макета;
- частотний детектор (ЧД), детекторна характеристика якого лінійна в межах можливих значень миттєвої частоти, після установки девіації частоти у модуляторі відповідні зміни мають місце в ЧД;
- фільтр нижніх частот (ФНЧ); його частота зрізу $F_{зр}$ установлюється на панелі макета.

Смуговий фільтр, ЧД і ФНЧ створюють схему стандартного частотного детектора – вона обведена на схемі пунктирною лінією. Макет містить вимірювачі середніх потужностей процесів і аналізатори спектрів на виходах смугового фільтра і ФНЧ, а також осцилограф на виході ФНЧ.

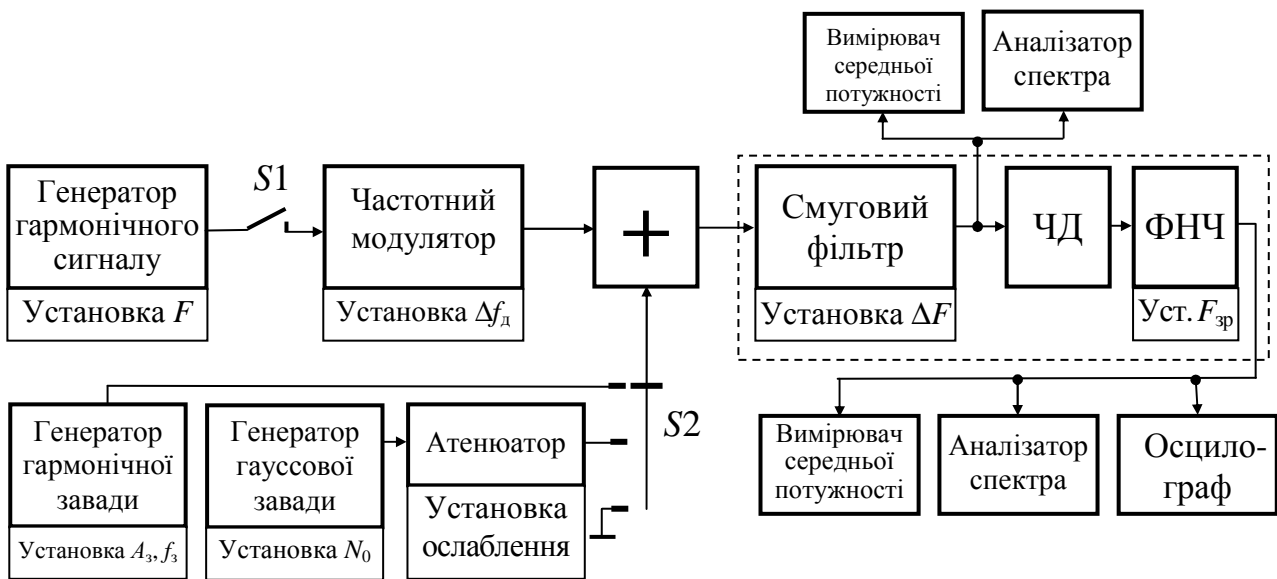


Рисунок 2 – Структурна схема макета

7 Вимоги до звіту

7.1 **Назва** лабораторної роботи.

7.2 **Мета** роботи.

7.3 **Результати** виконання домашнього завдання.

7.4 **Структурна схема** досліджень та **результати** виконання пп. 5.2...5.4 лабораторного завдання (таблиці і графіки).

7.5 **Висновки** за кожним пунктом завдання, в яких надати аналіз отриманих результатів (збіг експериментальних та теоретичних даних).

7.6 Дата, підпис студента, віза викладача з оцінкою за 100-бальною шкалою.

Література

1 **Баскаков С. И.** Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1988. – 448 с.

2 **Теория** электрической связи: Учебник для вузов / А. Г. Зюко, Д. Д. Кловский, В. И. Коржик, М. В. Назаров; Под ред. Д. Д. Кловского – М.: Радио и связь, 1998. – 432 с.