

# МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ І ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ЦИФРОВИХ ВИДІВ МОДУЛЯЦІЇ

Практичне заняття з  
дисципліни  
Теорія зв'язку

[ Мета заняття: ]

---

Засвоєння студентами основних принципів побудови модемів цифрових видів модуляції.

# Цифровий сигнал

Цифрові сигнали (ЦС) з'являються в результаті кодування переданих повідомлень. Цифровий сигнал — це послідовність символів, які слідуєть через фіксований інтервал часу (синхронна послідовність символів). В кінцевому обладнанні систем передачі, виконаному на логічних мікросхемах або процесорах, символи двійкові і позначаються 1 і 0, їх називають бітами, і слідуєть вони через інтервал  $T_6$ .

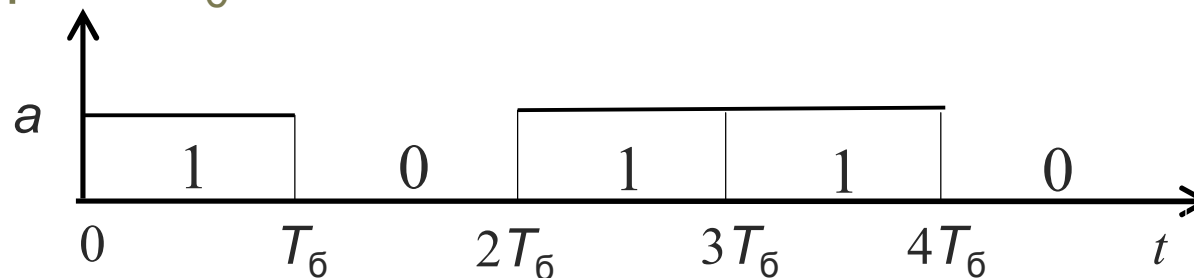


Рисунок 1 – Цифровий сигнал

# Спектр П-імпульсу

ЦС в абсолютній більшості випадків не підходить для безпосередньої передачі каналами зв'язку, перш за все, через його спектральні властивості. На рис. 2 наведено графік нормованого амплітудного спектра імпульсу тривалістю  $T$ . Якщо намагатися передавати ЦС каналом зв'язку П-імпульси зі збереженням їх форми, то смуга пропускання каналу зв'язку повинна бути значно більшою за  $1/T$ .

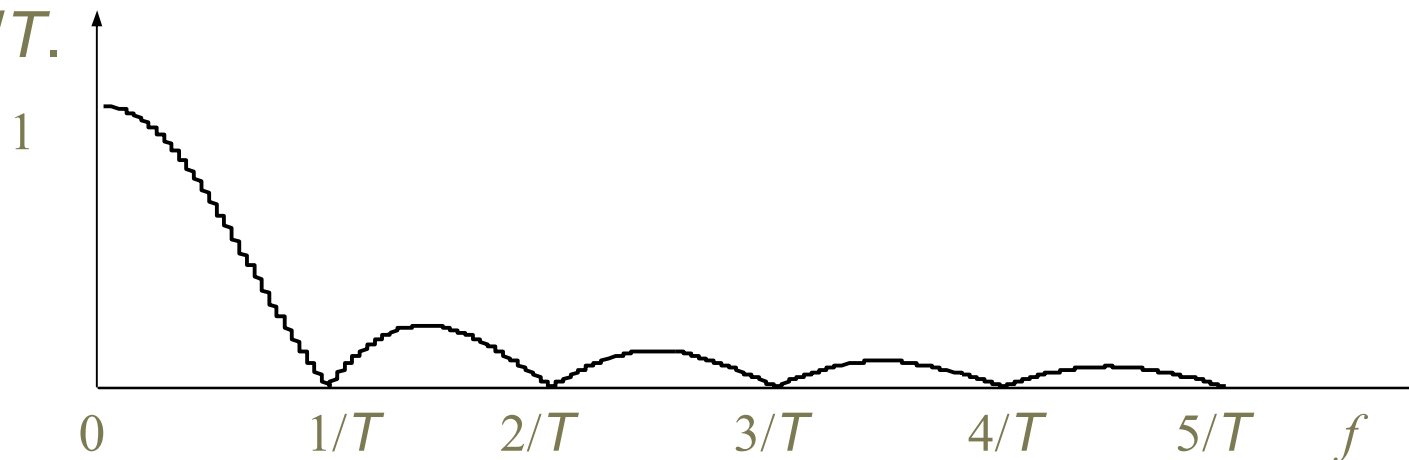


Рисунок 2 – Спектр П-імпульсу

# Задача модуляції

З метою економії смуги частот каналу зв'язку слід відмовитися від збереження П-подібної форми імпульсу при передачі – імпульс  $A(t)$  повинен мати згладжену форму.

Фактично, імпульс є переносником числа  $A$ , і при використанні імпульсів довільної форми, але з амплітудою  $A$ , досить зробити відлік амплітудного значення переданого імпульсу, щоб визначити це число.

Модульований сигнал  $s(t)$  повинен бути узгоджений з частотними і деякими іншими характеристиками безперервного каналу зв'язку.

Використовуваний метод модуляції визначає досяжні в каналі зв'язку швидкість передачі і стійкість перед завадами.

## Загальний вираз для модульованого сигналу при передачі ЦС

Для передачі ЦС каналами зв'язку використовуються імпульсні елементарні сигнали спеціальної форми  $s_i(t)$  – канальні символи, і модульований сигнал записується

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

де  $s_i^{(k)}(t - kT)$  –  $i$ -ий сигнал (канальний символ), який передається на  $k$ -му тактовому інтервалі;

$s_i(t)$ ,  $i = 0, 1, \dots, M - 1$  – ансамбль елементарних імпульсних сигналів (канальних символів);

$T$  – тривалість тактового інтервалу, тобто час, через який імпульсні сигнали посиляються в канал зв'язку;

$M$  – число елементарних сигналів; число  $M \geq 2$ ; якщо  $M = 2$ , то сигнал  $s(t)$  – двійковий; якщо  $M > 2$ , то сигнал  $s(t)$  – багатопозиційний.

# Що таке модуляційний код?

Правило переходу від комбінацій з  $n$  біт до сигналів  $s_i(t)$  визначає модуляційний код. Модуляційним кодом повинен бути код Грея – сусіднім в просторі сигналам присвоюються комбінації, що відрізняються тільки одним бітом. Це мінімізує ймовірність помилки біта при помилках передачі сигналів  $s_i(t)$ .

Таблиця 1 - Код Грея для AIM-4

$i$	біти	$a_i$
0	00	-1
1	01	-3
2	10	1
3	11	3

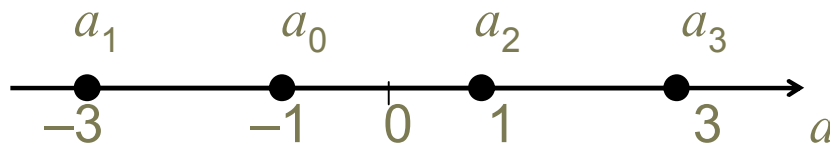


Рисунок 3 – Сузір'я AIM-4

## Схема формування сигналу AIM-M

Схему формування сигналу AIM-M наведено на рис. 4. На вхід надходить ЦС, що підлягає передаванню. **Кодер модуляційного коду (КМК)** бере  $n = \log_2 M$  біт  $i$  видає коефіцієнти  $a_i$   $\Pi$ -імпульсами тривалістю  $T$  або менше. Із цих імпульсів **формуючий фільтр (ФФ)** виробляє імпульси  $a_i A(t)$  – імпульси корінь із спектра *Найквіста* в масштабі  $a_i$ . Ця процедура повторюється на кожному тактовому інтервалі. Для різних значень  $M$  робота схеми відрізняється лише модуляційним кодом.

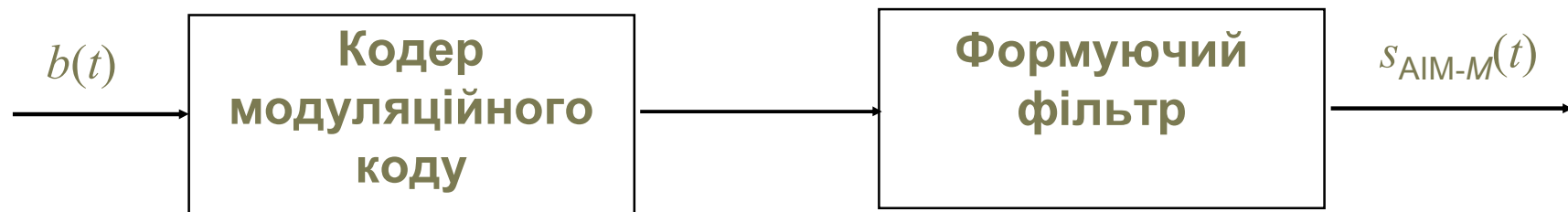


Рисунок 4 – Модулятор сигналу AIM-M



# Схема формування сигналів АМ-М і ФМ-2

Схема формування одновимірних смугових сигналів (модулятор) будується на основі схеми рис. 4 з доповненням генератором  $G$  несінного коливання  $\cos(2\pi f_0 t)$  і перемножувачем  $\times$  (рис. 5).

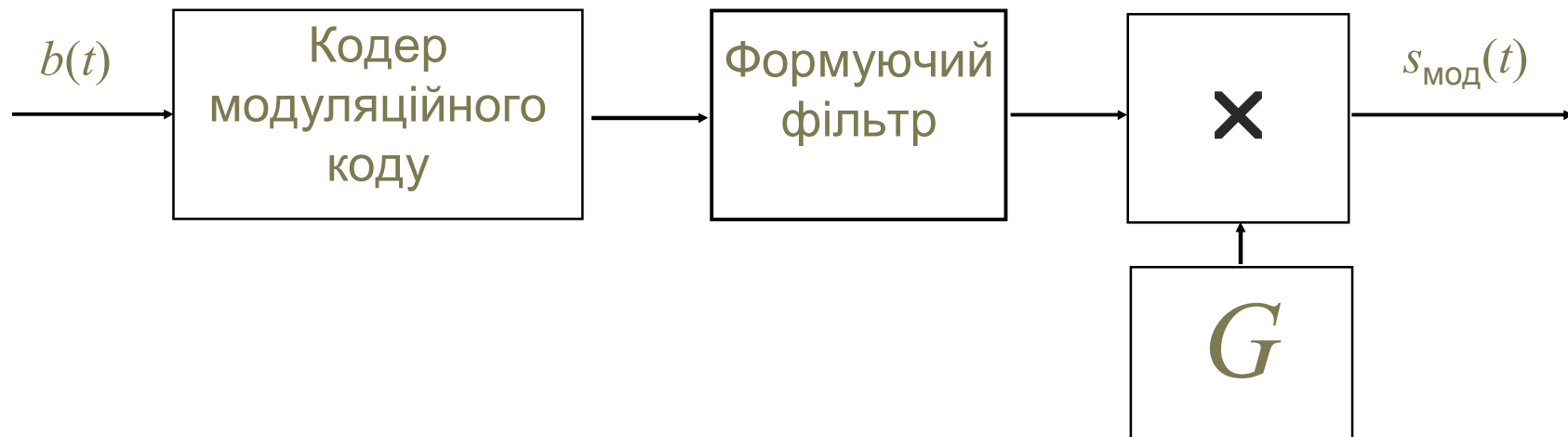


Рисунок 5 – Модулятор одновимірних смугових сигналів

## Схема формування двовимірних смугових сигналів (модулятор)

Схема формування двовимірних смугових сигналів (модулятор) будується на основі схеми рис. 5 з доповненням другим підканалом ідентичної структури і суматором (рис. 6). КМК ставить у відповідність  $n = \log_2 M$  вхідним бітам два П-імпульси з амплітудами  $a_{ci}$  і  $a_{si}$ ; П-імпульси фільтруються ФФ, щоб одержати імпульси корінь із спектра Найквіста; імпульси  $a_{ci}A(t)$  і  $a_{si}A(t)$  надходять на входи балансних модуляторів; отримані модульовані сигнали підсумовуються.

# Схема формування двовимірних смугових сигналів (модулятор)

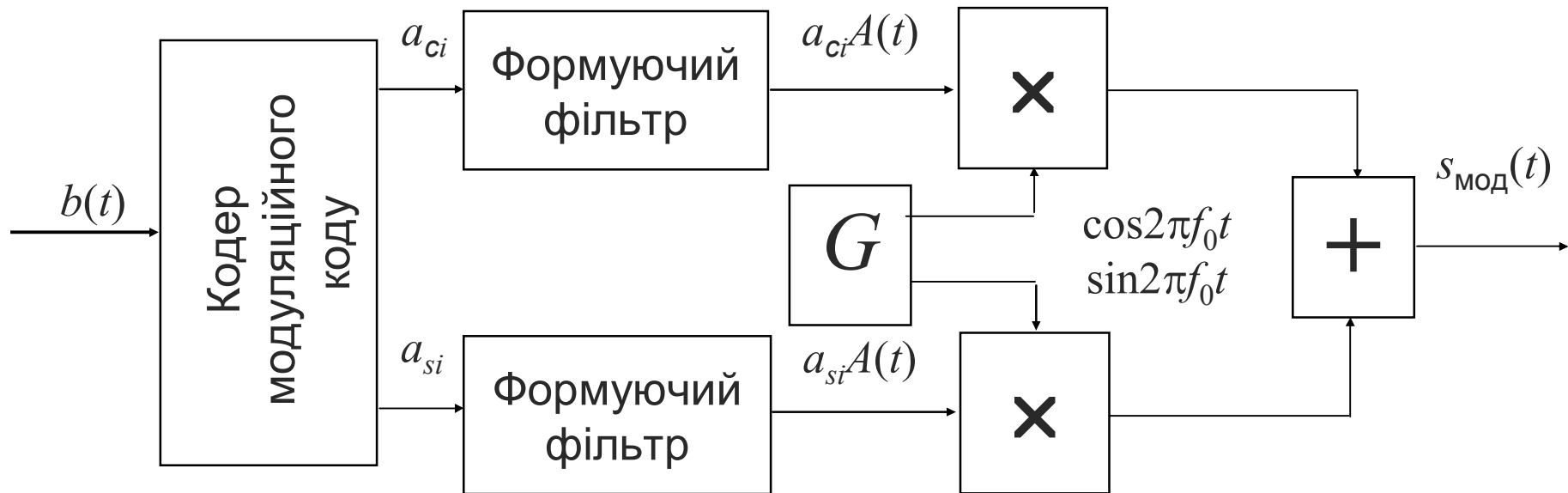


Рисунок 6 – Модулятор двовимірних смугових сигналів

## Завдання демодуляції сигналу цифрової модуляції

Будемо вважати, що демодулятор виносить рішення про переданий каналний символ на кожному тактовому інтервалі незалежно від рішень на інших тактових інтервалах.

Такий спосіб демодуляції називається поелементний прийом. При поелементному прийомі роботу демодулятора розглядають на окремих тактових інтервалах, тому сигнал, що демодулюється має вигляд  $z(t)=s(t)+n(t)$ . Демодулятор виносить рішення про номер переданого каналного символу і видає рішення бітами відповідно до модуляційного коду. Оскільки на вхід демодулятора надходить спотворений завадами сигнал, то рішення про передані каналні символи будуть містити помилки. Помилка каналного символу - це рішення демодулятора про те що отриманий символ  $s_j$  після надходження на вхід демодулятора символу  $s_i$  при  $j \neq i$ . Помилки з'являються випадково через випадковий характер завади. Невірне рішення демодулятора про прийнятий каналний символ приводить до появи на виході демодулятора одного або більше невірних біт (в залежності від модуляційного коду).

# Критерії оптимальності демодуляторів сигналів цифрової модуляції

У системах зв'язку і мовлення використовується, як правило, критерій ідеального спостерігача (критерій Котельникова) – мінімум безумовної ймовірності помилки каналного символу.

Оптимальний демодулятор реалізує завадостійкість модульованого сигналу (в термінології В.А. Котельникова: оптимальний демодулятор реалізує потенційну завадостійкість прийому).

## Вирішальні правила оптимальної демодуляції сигналів цифрової модуляції

Мінімум ймовірності помилки канального символу забезпечується, якщо ухвала має бути винесена по максимуму апостеріорної ймовірності канального символу: демодулятор виносить рішення про передачу символу  $\hat{s}_i$ , якщо виконується система з  $M - 1$  нерівностей:

$$P(s_i/z) > P(s_j/z), \quad j = 0, 1, \dots, M - 1; j \neq i \quad (2)$$

Якщо апріорні ймовірності канальних символів однакові, то мінімум ймовірності помилки канального символу забезпечується правилом максимуму правдоподібності канального символу: демодулятор виносить рішення про передачу символу, якщо максимальна умовна щільність ймовірності сигналу  $z(t)$  за умови, що  $z(t) = s_i(t) + n(t)$

$$p(z/s_i) > p(z/s_j), \quad j = 0, 1, \dots, M - 1; j \neq i \quad (3)$$

# Алгоритм оптимальної демодуляції сигналів цифрової модуляції.

Правило максимуму правдоподібності формулюється так: рішення про номер канального символу виноситься на користь того символу, відстань між яким і сигналом, що демодулюється мінімальна. Алгоритм роботи оптимального демодулятора можна трактувати наступним чином:

простір канальних символів розбивається на  $M$  непересічних областей з іменами  $s_i$ ,  $i = 0, \dots, M - 1$ ; кожна область  $s_i$  - це сукупність точок, які ближче до символу  $s_i(t)$ , ніж до інших символів; в разі одновимірних сигналів межами областей є точки на числовій осі, що знаходяться на однакових відстанях до прилеглих точок; в разі двовимірних сигналів межами областей є сукупністю точок (відрізки прямих), що знаходяться на однакових відстанях до прилеглих точок;

демодулятор виносить рішення про передачу сигналу  $\hat{s}_i$ , якщо точка  $z(t)$  в  $N$ -вимірному просторі потрапляє в область  $s_i$ .

# Розбиття простору сигналів на області сигналів

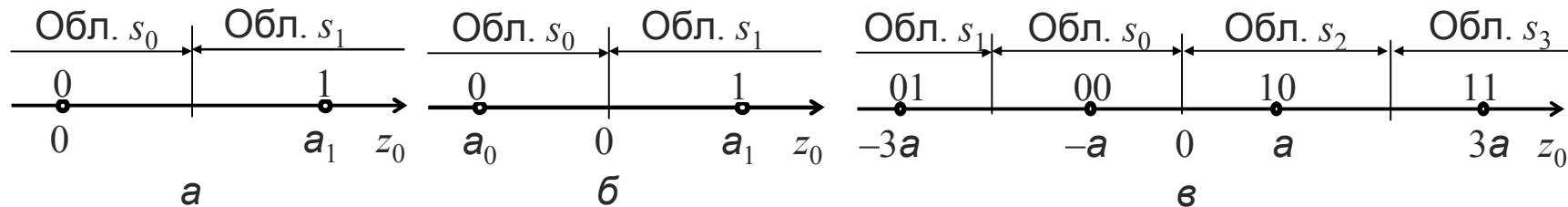


Рисунок 7 – Розбиття простору сигналів на області сигналів:  
*a* – АМ-2, *б* – ФМ-2, АІМ-2, *в* – АМ-4, АІМ-4

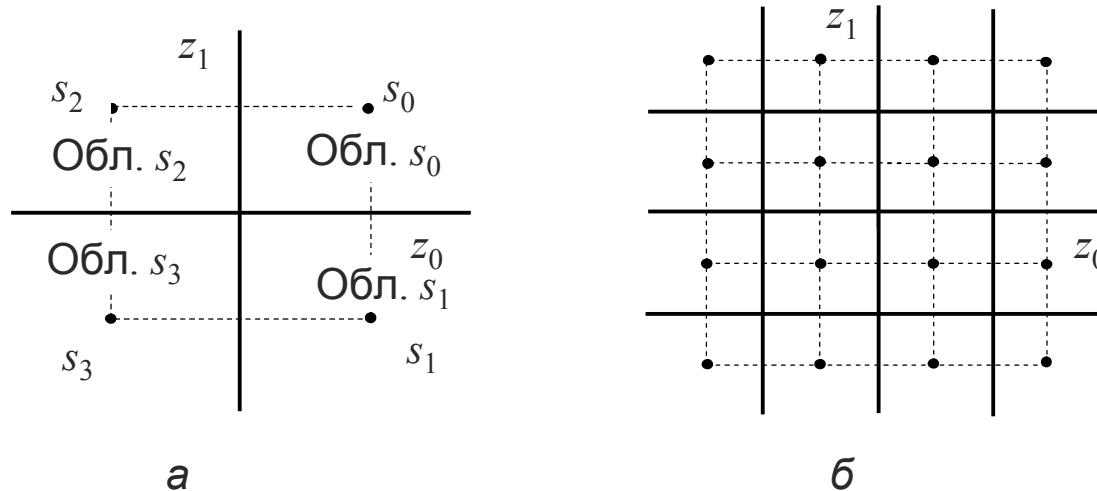


Рисунок 8 – Розбиття просторів сигналів на області сигналів  
 (межі областей показані жирними лініями): *a* – ФМ-4; *б* – КАМ-16



# Демодулятор сигналів AIM-M

На рис. 9 показана схема демодулятора сигналів AIM-M на основі узгодженого фільтра.

У схемі: Дискр. - дискретизатор для взяття відліку в момент  $t_0$ ;

ТС - тактова синхронізація, забезпечує взяття відліку в необхідний момент часу;

СР - вирішальна схема, яка виносить рішення про сигнал, що демодулюється на основі розбиття числової осі на області сигналів. СР видає рішення двійковими символами відповідно до модуляційного коду.

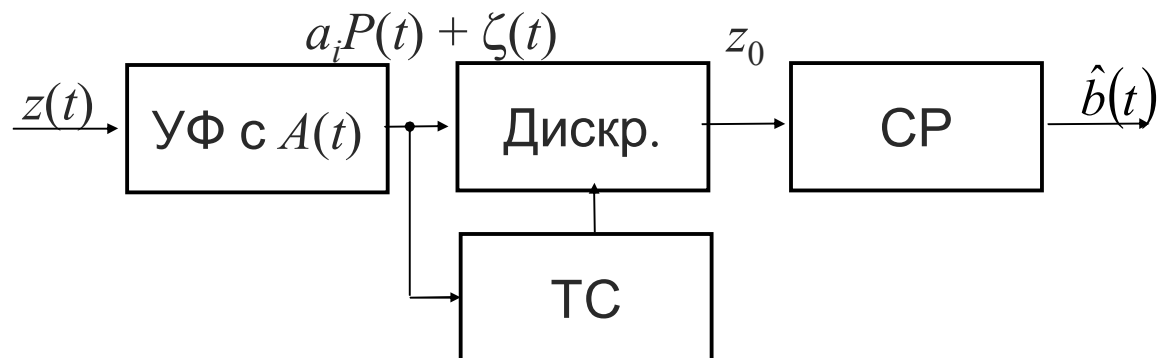


Рисунок 9 – Схема демодулятора сигналів AIM-M

# Демодулятор сигналів АМ-М та ФМ-2

На рис. 10 показана схема демодулятора сигналів АМ-М і ФМ-2. Схема містить синхронний детектор, що складається з перемножувача, генератора опорного колювання і ФНЧ. Опорна колювання, когерентне по відношенню до сигналу, формує схема відновлення несучої (ВН), роль ФНЧ виконує фільтр, узгоджений з низькочастотних імпульсом  $A(t)$ . СР виносить рішення про сигнал, що демодулюється на основі розбиття числової осі на області сигналів (рис. 7, а, б, в), РС видає рішення двійковими символами відповідно до модуляційного коду.

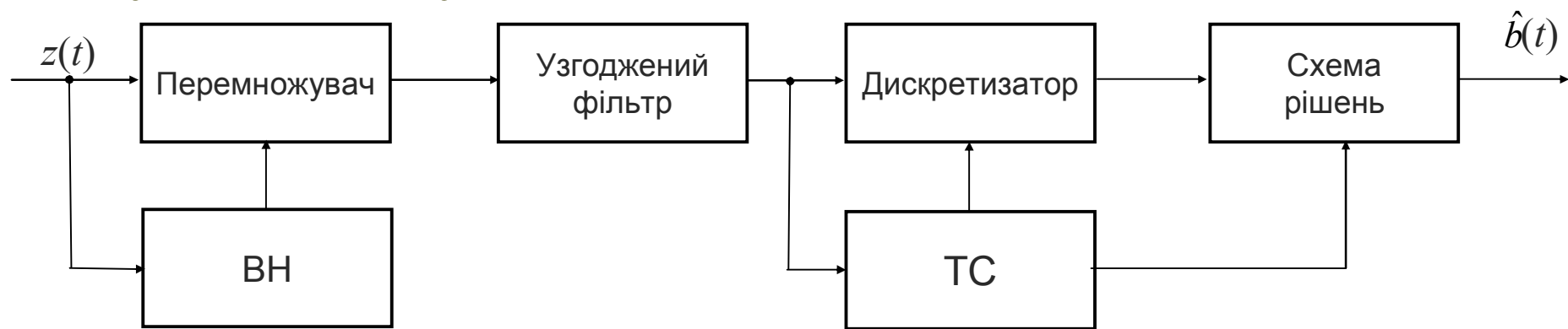


Рисунок 10 – Схема оптимального демодулятора сигналів АМ-2 і ФМ-2

# Інверсна робота демодулятора ФМ-2

Оскільки символи  $s_1(t)$  і  $s_0(t)$  рівноймовірні, то схема відновлення несійної демодулятора сигналу ФМ-2, побудована на основі ФАПЧ, може увійти в синхронізм з символом  $s_1(t)$  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 символом  $s_1(t)$ . Якщо ж ВН виробляє коливання, що збігається за фазою з символом  $s_0(t)$ , 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 різницевого (відносного) методу передавання, коли біти, що передаються, відображаються не в початкові фази радіоімпульсів (ФМ-2), а в різницю фаз сусідніх за часом радіоімпульсів (фазорізницева модуляція – ФРМ-2).

# Демодулятор двовимірних сигналів цифрової модуляції

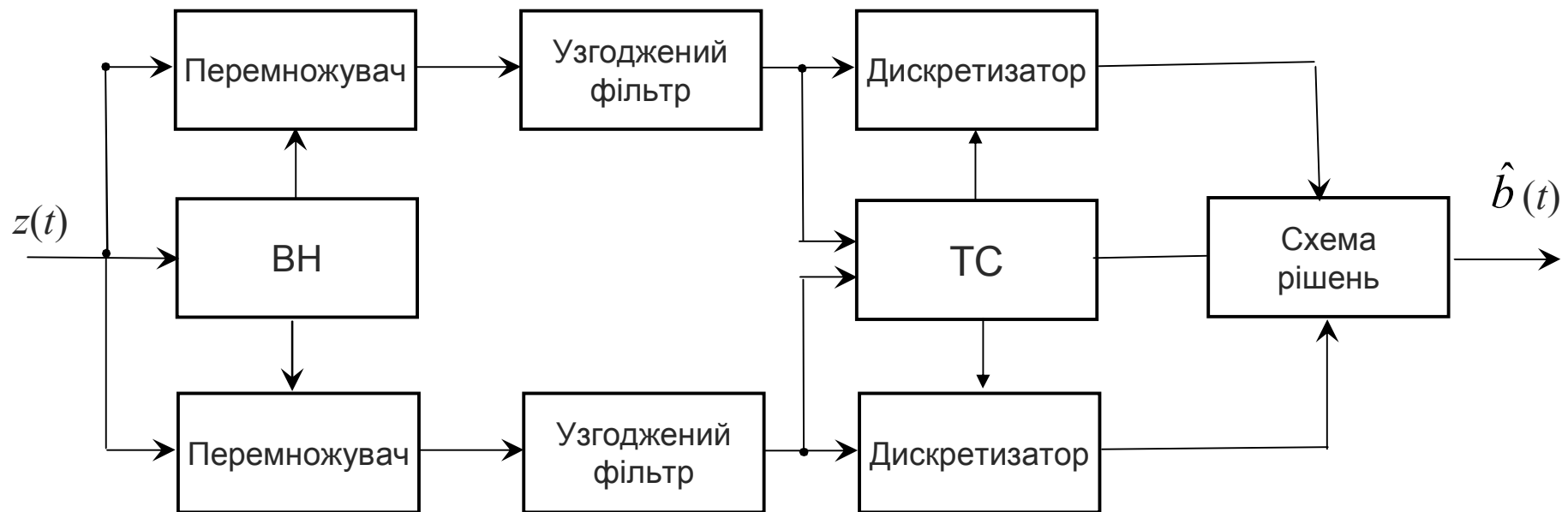


Рисунок 11 – Схема оптимального демодулятора двовимірних сигналів цифрових видів модуляції

# Демодулятор двовимірних сигналів цифрової модуляції

На рис. 11 показана схема демодулятора сигналів ФМ- $M$  ( $M > 4$ ), АФМ- $M$ , КАМ- $M$ . Оскільки такі сигнали двовимірні, то демодулятор містить два підканали: для обчислення  $z_0$  і  $z_1$ . Синхронні детектори не тільки перетворюють смугові сигнали в низькочастотні, а й забезпечують поділ косинусної і синусної складових сигналу, що демодулюється. У верхньому підканалі проводиться обробка косинусної складової, а в нижньому підканалі – синусної складової. Результатом обробки є координати сигналу, що демодулюється ( $z_0, z_1$ ). СР виносить рішення про сигнал, що демодулюється на основі розбиття числової осі на області сигналів (рис. 8, а, б), СР видає рішення двійковими символами відповідно до модуляційного коду.