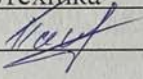


Вінницький національний технічний університет  
Факультет інформаційних електронних систем  
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

Бакалаврська дипломна робота на тему:

МОДУЛЯТОРИ/ДЕМОДУЛЯТОРИ QAM-N: УДОСКОНАЛЕННЯ  
СТРУКТУРИ ТА АЛГОРИТМУ РОБОТИ ДЛЯ ВИСОКИХ РІВНІВ  
ПОЗИЦІЙНОСТІ

Виконав: студент 2-го курсу, групи ПЗТ-22мс  
спеціальності 172 – Телекомунікації та  
радіотехніка

 Черната П. С.

Керівник: к.т.н., доц., професор каф. ІКСТ  
Барась С. Т.

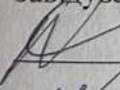
« 11 » 06 2024 р.

Рецензент: д.т.н., проф., професор каф. ІРТС  
Семенов А.О.

« 11 » 06 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

 д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 11 » 06 2024 р.

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інформаційних електронних систем  
Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій  
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації  
(шифр і назва)  
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка  
(шифр і назва)  
Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ІКСТ**

**д.т.н., професор В.М. Кичак**

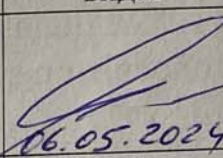
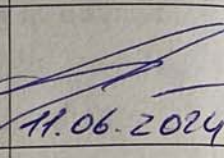
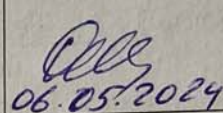
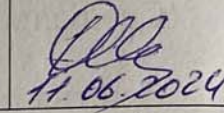
**«15» березня 2024 року**

## **ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

**Чернаті Павлу Сергійовичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи: Модулятори/демодулятори QAM-N: удосконалення структури та алгоритму роботи для високих рівнів позиційності  
керівник роботи Барась Святослав Тадіонович, канд. техн. наук, професор,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)  
затверджені наказом ВНТУ від «11» березня 2024 року № 80
- Строк подання студентом роботи: 07 червня 2024 року
- Вихідні дані до роботи: квадратурна амплітудна модуляція: QAM-256, QAM-512, QAM-1024, QAM-2048; множини значень амплітуд квадратурних компонент (для QAM-16: 1,3,-1,-3); коефіцієнт бітових помилок не більше  $10^{-6}$ ; відношення сигнал/шум – 20-40 дБ.
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, основи модуляційної схеми QAM-N, ефективність та завадостійкість QAM-N-модуляції, розробка структурних схем та алгоритмів роботи модулятора/демодулятора QAM-N-сигналу, прикладні аспекти застосування модуляції QAM-N високої позиційності, охорона праці.
- Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):  
Спрощена структурна схема модулятора QAM-16; структурна схема модулятора QAM-N та закон зміни квадратурних компонент; залежності бітових помилок від співвідношення с/ш для різних QAM-N; структурні схеми когерентного демодулятора та блоку відновлення несущої частоти; графіки продуктивності каналу для різних видів багатопозиційної модуляції.
- Консультанти розділів роботи

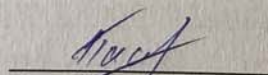
| Розділ             | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата                                                                                      |                                                                                                   |
|--------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    |                                           | завдання видав                                                                                    | завдання прийняв                                                                                  |
| Спеціальна частина | Барась С. Т.,<br>професор кафедри ІКСТ    | <br>06.05.2024 | <br>11.06.2024 |
| Охорона праці      | Решетарук С.В.<br>проф. каф. ВМДПБ        | <br>06.05.2024 | <br>11.06.2024 |

7. Дата видачі завдання «06» травня 2024 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів бакалаврської дипломної роботи                                                      | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської дипломної роботи (БДР) | 06.05.2024р.                  |          |
| 2     | Виконання спеціальної частини БДР. Перший рубіжний контроль виконання БДР                        | 20.05.2024р.                  |          |
| 3     | Виконання спеціальної частини БДР. Другий рубіжний контроль виконання БДР                        | 31.05.2024р.                  |          |
| 4     | Виконання розділу «Охорона праці»                                                                | 04.06.2024р.                  |          |
| 5     | Нормоконтроль БДР                                                                                | 05.06.2024р.                  |          |
| 6     | Попередній захист БДР                                                                            | 06.06.2024р.                  |          |
| 7     | Рецензування БДР                                                                                 | 07.06.2024р.                  |          |
| 8     | Захист БДР                                                                                       | 12.06.2024р.                  |          |

Студент

  
(підпис)

Черната П. С.

Керівник роботи

  
(підпис)

Барась С. Т.

## АНОТАЦІЯ

Модулятори/демодулятори QAM-N: удосконалення структури та алгоритму роботи для високих рівнів позиційності. Бакалаврська дипломна робота / П. С. Черната – Вінниця: ВНТУ, 2024. – 91 с., 31 рис., 10 табл., 24 дж. – українською мовою.

Метою роботи є удосконалення структури та алгоритмів функціонування схем формування та демодуляції сигналів QAM-N-модуляції для високих рівнів позиційності. Для цього розглянуті питання спектральної та енергетичної ефективності при QAM-N-модуляції, а також її завадостійкість. Виконана розробка структури та алгоритмів функціонування схем формування та демодуляції QAM-N-сигналів включно з двома варіантами побудови блоку відновлення несущої частоти. Дана оцінка прикладних аспектів застосування модуляції QAM-N високої позиційності, розглянуті принципи формування сигнально-кодових конструкцій в контексті адаптації модуляційної схеми до характеристик каналу передачі. Виконано аналіз діаграми-сузір'я при впливі дестабілізуючих чинників.

Виконано розділ з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

## ABSTRACT

QAM-N modulators/demodulators: improvement of the structure and algorithm of operation for high levels of positionality. Bachelor thesis / P. S. Chernata – Vinnytsia: VNTU, 2024. – 91 p., 31 fig., 10 tabl., 24 s. - In ukrainian.

The aim of the work is to improve the structure and functioning algorithms of QAM-N-modulation signal formation and demodulation schemes for high levels of positionality. For this purpose, the issues of spectral and energy efficiency in QAM-N-modulation, as well as its immunity to interference, are considered. The development of the structure and functioning algorithms of the QAM-N-signal formation and demodulation schemes was carried out, including two variants of the construction of the carrier frequency recovery unit. The assessment of the applied aspects of the application of QAM-N modulation of high positionality is given, the principles of formation of signal-code structures in the context of adaptation of the modulation scheme to the characteristics of the transmission channel are considered. The analysis of the constellation diagram under the influence of destabilizing factors was performed.

The section on labor protection and life safety has been completed.

## ЗМІСТ

|       |                                                                   |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------|----|
|       | ВСТУП .....                                                       | 4  |
| 1     | ОСНОВИ МОДУЛЯЦІЙНОЇ СХЕМИ QAM-N.....                              | 7  |
| 1.1   | Реалізація I/Q методу для модуляції QAM-N .....                   | 7  |
| 1.2   | Квадратурна амплітудна модуляція з придушеною несущою .....       | 14 |
| 1.3   | Ефективність та завадостійкість QAM-N модуляції .....             | 16 |
| 1.3.1 | Спектральна ефективність .....                                    | 17 |
| 1.3.2 | Енергетична ефективність .....                                    | 20 |
| 1.3.3 | Завадостійкість квадратурної амплітудної модуляції .....          | 23 |
| 1.4   | Висновки до розділу .....                                         | 27 |
|       | РОЗРОБКА СТРУКТУРНИХ СХЕМ ТА АЛГОРИТМІВ РОБОТИ                    |    |
| 2     | МОДУЛЯТОРА/ДЕМОДУЛЯТОРА QAM-N-СИГНАЛУ .....                       | 30 |
| 2.1   | Система цифрового зв'язку .....                                   | 30 |
| 2.2   | Структурна схема та алгоритм роботи модулятора QAM-N .....        | 34 |
| 2.3   | Структурна схема та алгоритм роботи демодулятора QAM-N .....      | 39 |
| 2.4   | Блок відновлення несущої частоти .....                            | 43 |
| 2.5   | БВНЧ з системою фазового автопідстроювання частоти .....          | 44 |
| 2.6   | Висновки до розділу .....                                         | 47 |
|       | ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ МОДУЛЯЦІЇ QAM-N                    |    |
| 3     | ВИСОКОЇ ПОЗИЦІЙНОСТІ .....                                        | 48 |
| 3.1   | Аналіз діаграми-сузір'я при впливі дестабілізуючих чинників ..... | 49 |
| 3.2   | Адаптивна модуляція і кодування .....                             | 55 |
| 3.3   | Принцип формування сигнально-кодових конструкцій .....            | 56 |
| 3.4   | Висновки до розділу .....                                         | 60 |
| 4     | ОХОРОНА ПРАЦІ .....                                               | 61 |
| 4.1   | Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....            | 61 |
| 4.2   | Технічні рішення з безпечної організації робочих місць .....      | 64 |
| 4.2.1 | Мікроклімат.....                                                  | 64 |
| 4.2.2 | Склад повітря робочої зони.....                                   | 65 |
| 4.2.3 | Виробниче освітлення.....                                         | 66 |

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|                                                                                                  | 3  |
| 4.2.4 Виробничий шум.....                                                                        | 67 |
| 4.2.5 Виробничі випромінювання .....                                                             | 68 |
| 4.3 Пожежна безпека.....                                                                         | 70 |
| 4.3.1 Технічне рішення системи запобігання пожежі.....                                           | 70 |
| 4.3.2 Технічне рішення системи протипожежного захисту.....                                       | 71 |
| 4.4 Висновки до розділу .....                                                                    | 72 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                    | 73 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                  | 76 |
| Додаток А (обов'язковий) - Ілюстративний матеріал .....                                          | 79 |
| Додаток Б – Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність<br>текстових запозичень ..... | 87 |

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Цифрова модуляція – це процес перетворення потоку інформаційних символів у послідовність елементів сигналу. Зазначимо, що модуляція – це неперервний процес, а маніпуляція – дискретний процес. Серед достатньо великого розмаїття маніпуляцій квадратурна амплітудна модуляція, яка належить до багатопозиційних видів модуляції, є найбільш ефективним способом модуляції з точки зору ефективності використання частотного ресурсу. Цей вид модуляції представляє собою суму двох несущих коливань однієї частоти, але зміщених по фазі одна відносно іншої на кут  $90^\circ$ . Кожна несуща модулюється відповідно до значення бітового потоку по амплітуді. Вперше цей вид модуляції був застосований у технології EDGE в мережах 3G [1-4]. На сьогодні сфера застосування QAM-N суттєво розширилась: супутниковий зв'язок, Wi-Fi, WiMax, мобільний інтернет тощо [3-5]. Отже, очевидна актуальність теми, яка передбачає розгляд найбільш ефективного способу модуляції, причому при його ускладненому варіанті – максимальних рівнях позиційності.

Для оцінки достовірності передачі дискретних повідомлень при використанні N-позиційних видів модуляції можна прийняти ймовірність помилки при демодуляції N-го символу  $P_E$ . Але при цьому важко адекватно порівняти різні види модуляції. Користувача зазвичай цікавить достовірність передачі послідовності двійкових символів, тому правильніше буде використати у якості такого показника ймовірність помилки на біт  $P_b = f(P_E)$ .

Вибір конкретної модуляційної схеми базується на аналізі трьох параметрів:  $P_b$ ,  $E_b/N_0$ ,  $R_b/W$  – ймовірності бітової помилки, відношення енергії, яка витрачається на передачу одного біта повідомлення, до спектральної щільності адитивного білого гаусівського шуму при заданому значенню ймовірності похибки, а також спектральної ефективності (відношення швидкості передачі  $R_b$  до смуги частот, необхідної для передачі сигналів з вибраним видом модуляції  $W$ ).

При виборі модуляційної схеми намагаються досягти таких цілей:

- мінімізація імовірності бітової помилки;
- оптимізація енергетичної ефективності;
- отримання максимального значення спектральної ефективності;
- максимальне спрощення трактів формування та обробки сигналів.

Очевидно, що зазначені цілі у загальному взаємосуперечливі. Тому потрібне компромісне рішення.

*Аналіз останніх досліджень.* Іноді організація оптоволоконних транзитних каналів економічно недоцільна. Тоді знаходять застосування радіоканали прямого зв'язку НВЧ-діапазону, що є інтегральною частиною мережі мобільного стільникового зв'язку. Вони використовуються для реалізації транзитного каналу передачі між базовими станціями (BTS/NodeB) та контролерами радіомережі (BSC/RNC) більш ніж у 50% випадків по всьому світу. Бурхливий розвиток сервісів передачі в мобільних мережах через популярність смартфонів призвів до зростання потреби щодо передачі широкосмугового трафіку і посилення вимог до пропускної спроможності обладнання транзитних радіоканалів [4-6].

Збільшення пропускної здатності пов'язують з такими кроками.

- Перехід від модуляції QAM-256 до модуляційної схеми з більшою позиційністю - QAM-4096. При цьому збільшиться інформаційна ємність у каналах при збереженні їх ширини смуги.
- Підтримка замість ширини смуги 56 МГц у традиційному діапазоні частот 6–42 ГГц каналів із шириною смуги 112 МГц.

*Мета та постановка задачі.* Метою даної роботи є удосконалення структури та алгоритмів функціонування схем формування та демодуляції сигналів QAM-N-модуляції для високих рівнів позиційності.

Задачами бакалаврської дипломної роботи є:

- аналіз математичних залежностей для I/Q методу формування QAM-N-сигналів;

- аналіз спектральної і енергетичної ефективності та завадостійкості модуляції QAM-N;
- розробка структурних схем та алгоритмів роботи модулятора/демодулятора QAM-N-сигналу;
- оцінка прикладних аспектів застосування модуляції QAM-N високої позиційності;
- розробка заходів з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

*Об'єкт дослідження* це процеси формування, передачі, прийому та обробки QAM-N-сигналів.

*Предмет дослідження* є методи та засоби, які забезпечують формування QAM-N-сигналів та їх демодуляцію.

*Практичне значення.* Практичне значення роботи полягає у використанні її результатів для забезпечення високих показників телекомунікаційних пристроїв та в навчальному процесі в дисциплінах «Технології безпроводних мереж зв'язку» і «Сигнали та широкосмугові технології в телекомунікаціях».

# 1 ОСНОВИ МОДУЛЯЦІЙНОЇ СХЕМИ QAM-N

## 1.1 Реалізація I/Q методу для модуляції QAM-N

Телекомунікаційні технології використовують різні модуляційні схеми залежно від завадової обстановки, параметрів каналу передачі, необхідної швидкості передачі інформації тощо. Широкого поширення набули методи фазової маніпуляції, оскільки важливою їх перевагою вважається потенційно висока завадостійкість. Використовується також частотна маніпуляція. Терміни «маніпуляція» та «модуляція» будемо вживати рівноцінно, але маємо на увазі, що вхідним сигналом є цифрова послідовність, отже, термін «маніпуляція» є більш точним. Зазначимо, що для фазової та частотної модуляції амплітуда колювання протягом сеансу зв'язку залишаються постійними. Для фазової модуляції незмінною залишається також і частота, змінюється лише початкова фаза кожного канального символу.

Квадратурна амплітудна модуляція (КАМ) відрізняється від вище згаданих тим, що кожний канальний символ характеризується своїм значенням амплітуди та початкової фази. Зрозуміло, що кількість можливих значень цих параметрів дискретна і, звичайно, цей тип модуляції також є цифровим. Один канальний  $i$ -символ сигналу при такому способі модуляції можна представити наступною рівністю [1]:

$$s_{QAM}(t) = A_i \cos(\omega_0 t + \varphi_i) = \operatorname{Re}[A_i \exp(j\varphi_i) \exp(\omega_0 t)], \quad (1.1)$$

$$(i - 1)T_b < t \leq iT_b,$$

у якому  $A_i \exp(j\varphi_i)$  є комплексною амплітудою цього канального символу;  
 $i = 1, 2, \dots, M$ .

У подальшому індекс  $i$  (для спрощення аналітичних залежностей) використовувати не будемо, розуміючи, що формули відносяться до одного (певного) символу.

Запишемо фазоманіпульований сигнал (символ з амплітудою  $A$ ) у вигляді:

$$\begin{aligned} s_{QAM}(t) &= A \cos(\omega_0 t + \varphi) = A \cos \varphi \cdot \cos \omega_0 t - A \sin \varphi \cdot \sin \omega_0 t = \\ &= I(t) \cdot \cos \omega_0 t - Q(t) \cdot \sin \omega_0 t. \end{aligned} \quad (1.2)$$

$I(t)$  та  $Q(t)$  – це відповідно амплітуди синфазної та квадратурної компонент модульованого сигналу, які на інтервалі  $(i - 1)T_C < t \leq iT_C$ , характеризуються незмінним значенням, що визначається формою блоку бітів (видом кодової комбінації). Конкретні значення амплітуд синфазної та квадратурної компонент  $I(t)$  та  $Q(t)$  залежать як від зазначеного виду кодової комбінації, так і від позиційності квадратурної амплітудної модуляції. Таким, чином, амплітуда модульованого сигналу (символу) та його початкова фаза визначаються за такими формулами [1-2].

Алгоритм зміни амплітуди модульованого сигналу

$$A_m = \sqrt{Q_m^2 + I_m^2} \quad (1.3)$$

Алгоритм зміни фази модульованого сигналу

$$\varphi_m = \arctg \frac{Q_m}{I_m} \quad (1.4)$$

Таким чином, при використанні квадратурної амплітудної модуляції інформація кодується одночасними змінами амплітуди і фази несущого коливання. Амплітуда вектора  $Z_m$  визначається співвідношенням (1.3), а кут, який цей вектор утворює з віссю абсцис, визначається співвідношенням (1.4).

Для даного алгоритму важливо, що при модуляції синфазної і квадратурної складових несущого коливання використовується одне і те ж значення дискрета зміни амплітуди. Тому кінці векторів модульованого

коливання утворюють прямокутну сітку на фазовій площині дійсної –  $\text{Re}(z)$  і уявної складових вектора модульованого сигналу –  $\text{Im}(z)$ . Число вузлів цієї сітки визначається позиційністю використовуваного алгоритму QAM. Схему розташування вузлів на фазовій площині модульованого QAM коливання прийнято називати сузір'ям (constellation). Сигнальне сузір'я для QAM-16 наведено на рисунку 1.1.

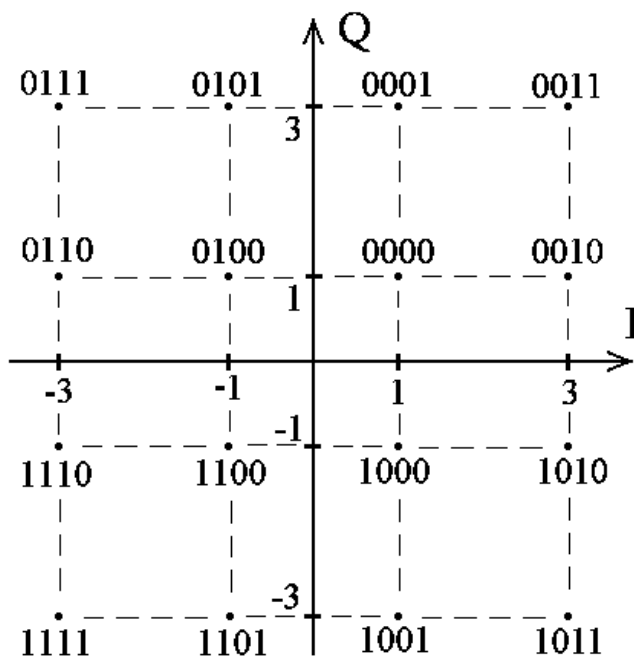


Рисунок 1.1 – Сигнальне сузір'я модуляції QAM-16

У позначенні типу алгоритму QAM-N число N набуває значення типу  $2^n$  і відповідає кількості вузлів на фазовій сітці, а також максимальній кількості різних значень вектора модульованого сигналу. У той же час  $n$  – показник при 2, відповідає показнику спектральної ефективності даного алгоритму.

Таким чином, застосовується квадратурна амплітудна модуляція різного рівня N QAM-N. Рівень модуляції визначає кількість біт, які передаються одним станом несущої (одним символом). Якщо QAM-16, то одним станом несущої передається 4 біти інформації, якщо QAM-32 – 5 біт, якщо QAM-64 – 6 біт і т.д.

На рисунку 1.2 наведено спрощену структуру модулятора QAM-16 модульованого сигналу.

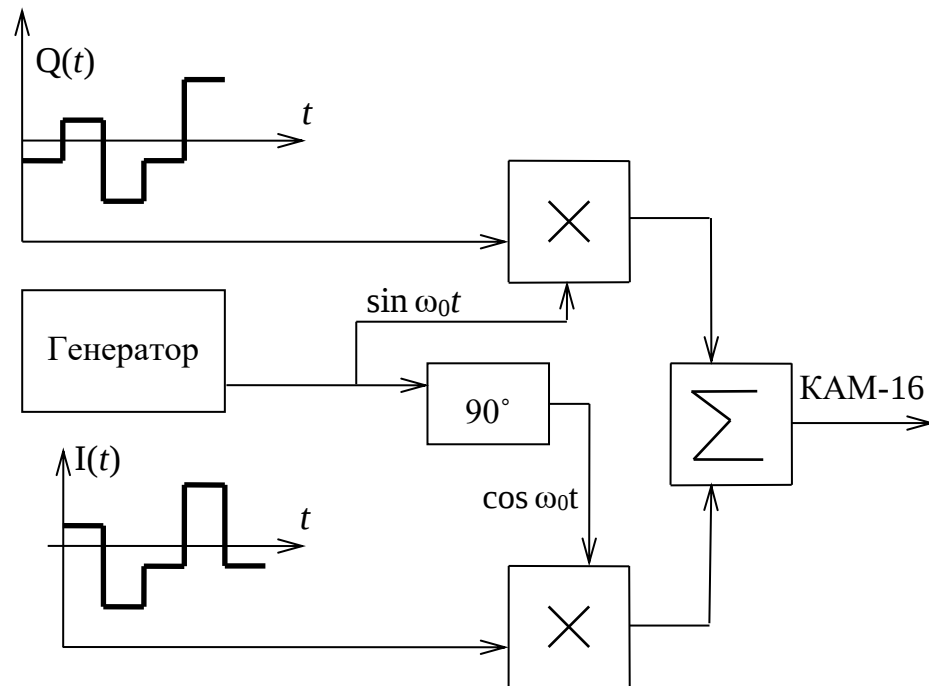


Рисунок 1.2 – Спрощена структурна схема модулятора QAM-16

На схемі, рисунок 1.2, показані закони зміни амплітуд синфазної та квадратурної компонент залежно від виду кодових комбінацій. Вони наведені у вигляді чотирьохпозиційних дискретних сигналів, які діють на входах помножувачів. Для модуляції QAM-16, наприклад, значення  $I_k$  та  $Q_k$  належать множині  $(1, 3, -1, -3)$  і визначають, відповідно, значення дійсної та уявної координат вектора модульованого коливання. Зазначимо, що реалізація знаків «плюс/мінус» амплітуд синфазної  $I_k$  та квадратурної  $Q_k$  компонент - це зміни фази синусоїдальної та косинусоїдальної несущих на  $180^\circ$  у помножувачах наведеної схеми. Множина значень амплітуд синфазної та квадратурної компонент  $(1, 3, -1, -3)$  наведена без будь-якої розмірності, що означає, що ці рівні модуляції мають відносний характер.

У таблиці 1.1 наведена відповідність між видами кодових комбінацій, значеннями амплітуд синфазної  $I_m$  та квадратурної  $Q_m$  компонент, а також фазами несущого коливання у відповідному символі [2-3].

Таблиця 1.1 – Закон модуляції QAM-16

| Кодові комбінації | $I_m$ | $Q_m$ | $ Z_m $     | $\varphi_m$  |
|-------------------|-------|-------|-------------|--------------|
| 0000              | 1     | 1     | $\sqrt{2}$  | $45^0$       |
| 0001              | 1     | 3     | $\sqrt{10}$ | $\sim 71^0$  |
| 0010              | 3     | 1     | $\sqrt{10}$ | $\sim 19^0$  |
| 0011              | 3     | 3     | $\sqrt{18}$ | $45^0$       |
| 0100              | -1    | 1     | $\sqrt{2}$  | $135^0$      |
| 0101              | -1    | 3     | $\sqrt{10}$ | $\sim 109^0$ |
| 0110              | -3    | 1     | $\sqrt{10}$ | $\sim 161^0$ |
| 0111              | -3    | 3     | $\sqrt{18}$ | $135^0$      |
| 1000              | 1     | -1    | $\sqrt{2}$  | $315^0$      |
| 1001              | 1     | -3    | $\sqrt{10}$ | $\sim 289^0$ |
| 1010              | 3     | -1    | $\sqrt{10}$ | $\sim 341^0$ |
| 1011              | 3     | -3    | $\sqrt{18}$ | $315^0$      |
| 1100              | -1    | -1    | $\sqrt{2}$  | $225^0$      |
| 1101              | -1    | -3    | $\sqrt{10}$ | $\sim 251^0$ |
| 1110              | -3    | -1    | $\sqrt{10}$ | $\sim 199^0$ |
| 1111              | -3    | -3    | $\sqrt{18}$ | $225^0$      |

Квадратурна амплітудна модуляція характеризується тими ж властивостями, що і гармонійна амплітудна модуляція:

- ширина спектру КАМ-сигналу дорівнює ширині спектра модулюючого сигналу;
- спектр КАМ-сигналу розташований на несущій частоті.

Цікаво також порівняти цей вид модуляції з фазовою модуляцією.

На відміну від фазової модуляції (наприклад 16ФМ), при квадратурній амплітудній модуляції QAM-16 того ж рівня досягається більша відстань між сусідніми точками в площині IQ, розподіляються точки більш рівномірно, що сприяє зниженню помилок прийому даних.

У той час, коли можна передавати більше біт на символ, рівні енергії залишаються тими ж, а точки на діаграмі повинні бути ближче одна до одної, то передача стає більш вразливою до шуму. Це призводить до більш високої ймовірності помилки, ніж для нижчих рівнів КАМ. Таким чином, існує баланс

між отриманням високих швидкостей передачі даних та підтримки прийнятної швидкості бітових помилок для будь-якої системи радіозв'язку.

Аналіз спектрів сигналів КАМ і сигналів ФМ показує, що при рівній кількості точок у сигнальному сузір'ї спектри сигналів однакові. Проте сигнали ФМ та КАМ мають різну стійкість до перешкод: сигнали КАМ мають кращу завадостійкість, ніж сигнали ФМ. Основна причина цього у тому, що відстань  $d$  між сигнальними точками у ФМ при однаковій нормованій потужності сигналу менша відстані між сигнальними точками в КАМ, рисунок 1.3 [3].

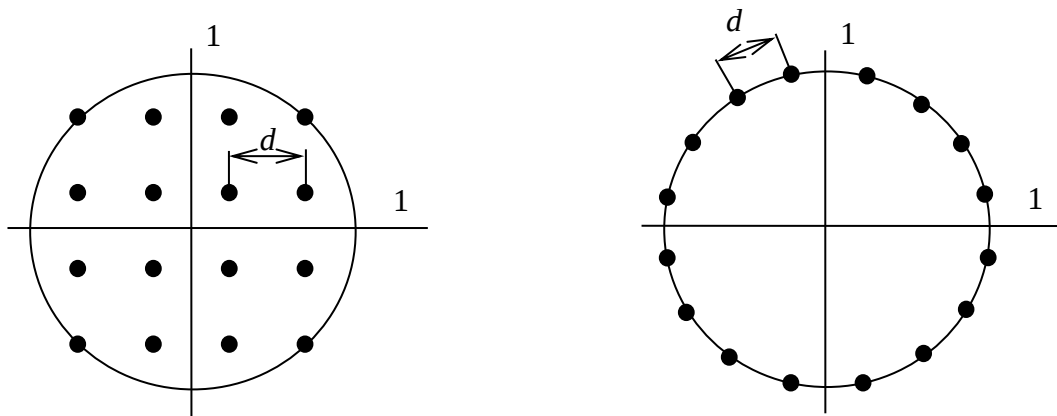


Рисунок 1.3 – Сигнальні сузір'я QAM-16 та 16ФМ

Відстань  $d$  між сусідніми сигнальними точками сузір'я для КАМ-сигналу з  $L$  рівнями модуляції (показник при 2) визначається виразом:  $d = \sqrt{2}/(L - 1)$ .

Аналогічно для ФМ з  $M$  числом фаз:  $d = 2\sin(\pi/M)$ . Отже, наприклад:

при  $L=4$  і  $M=16$  отримаємо  $d_{QAM} = 0,471$  і  $d_{ФМ} = 0,390$ ;

при  $L=5$  і  $M=32$  отримаємо  $d_{QAM} = 0,283$  і  $d_{ФМ} = 0,196$ .

Зі збільшенням порядку модуляції зростає швидкість передачі інформації, тобто сигнал може нести більше біт інформації на символ. Число біт, що передаються одним станом (символом), визначається  $L = \log_2 N$ , де  $L$  – рівень модуляції.

Збільшення швидкості передачі даних зі збільшенням порядку модуляції відбувається на шкоду завадостійкості. Схеми модуляції вищого порядку значно менш стійкі до шумів і перешкод.

Сучасні системи радіодоступу використовують динамічні методи адаптивної модуляції: аналізують каналні умови і вибирають схему модуляції, яка забезпечує найвищу швидкість передачі даних для заданих умов. Відстежується рівень сигнал-шум, і, опираючись на нього, оптимізується система передачі. Таким шляхом досягається найнадійніша передача даних, з найменшим відсотком помилок.

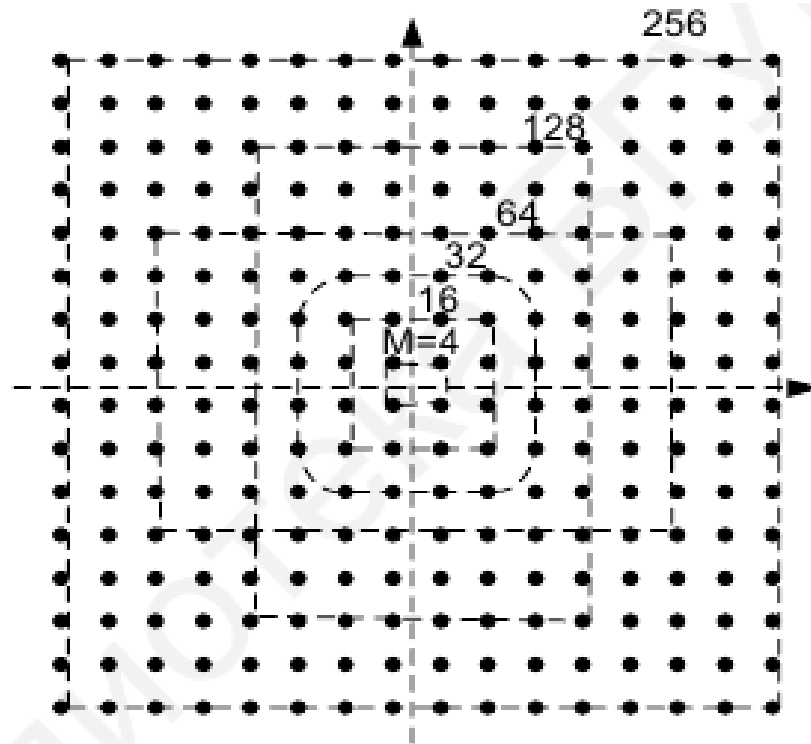


Рисунок 1.4 – Сигнальна діаграма QAM-N різної позиційності

Завадостійкість КАМ і її спектральна ефективність обернено пропорційні. Для пояснення скористаємося геометричним трактуванням (див. рисунок 1.4): збільшення кількості точок сузір'я призводить до зменшення відстані  $d$  між ними. Вплив завад у радіоканалі призводить до виникненню непередбачуваних змін амплітуди та фази переданого сигналу, і, отже, зростає імовірність помилок при розпізнаванні вектора  $Z$ . Допустимі значення амплітудних та фазових спотворень КАМ-сигналу, що виникають внаслідок впливу шуму, являють собою круг діаметром  $d$ , центром якого є відповідна точка сузір'я. Саме з цієї діаграми, рисунок 1.4, видно, що при квадратурній амплітудній

модуляції сигнальні точки розташовані на комплексній площині рівномірно і це збільшує відстань між сусідніми сигнальними точками, що покращує завадозахищеність системи зв'язку з КАМ. До речі, при фазовій модуляції всі сигнальні точки розташовані по колу комплексної площини і збільшення формату фазової модуляції призводить до швидкого зменшення відстані між кінцями сусідніх векторів, тобто до зменшення завадостійкості.

## 1.2 Квадратурна амплітудна модуляція з придушеною несущою

Амплітудно-фазова модуляція з придушенням несущої (CAP – Carrier less Amplitude modulation/Phase modulation) є модуляція, що знайшла широке застосування в галузі телекомунікацій, особливо на DSL лініях. Особливість CAP-модуляції полягає у спеціальній обробці модульованого інформаційного сигналу перед відправкою його до лінії. У процесі цієї обробки зі спектру модульованого сигналу вилучається складова, яка відповідає частоті коливання колишнього КАМ. Після того, як приймач приймає переданий інформаційний сигнал, він спочатку відновлює частоту коливання, а вже після цього відновлює інформаційний сигнал. Такі маніпуляції зі спектром виконуються для того, щоб зменшити частку неінформативної складової в спектрі інформаційного сигналу, що передається. Це робиться для забезпечення більшої енергетики сигналу і зменшення рівня перехресних перешкод у сигналів, які передаються одночасно.

Основні засади формування вихідного CAP-модульованого сигналу відповідають принципам формування КАМ-сигналу. Відмінності зазначених методів полягають у наявності додаткових процедур, необхідних для формування та відновлення спектра CAP-модульованого сигналу. Одна з можливих функціональних схем формування сигналу, модульованого відповідно до принципів методу CAP, представлена на рисунку 1.5.

Для придушення гармоніки несущого коливання використовується синфазний і квадратурний фільтри. Для адекватного відновлення сформованого таким чином сигналу на приймальній стороні повинні бути виконані операції з

відновлення несущого коливання. Після відновлення несущої приймач виконує такі самі операції, як і приймач КАМ. Тому, принаймні, теоретично приймач CAP може взаємодіяти з передавачем КАМ. CAP-модуляція може бути використана для формування сигналів у різних технологіях xDSL [4].

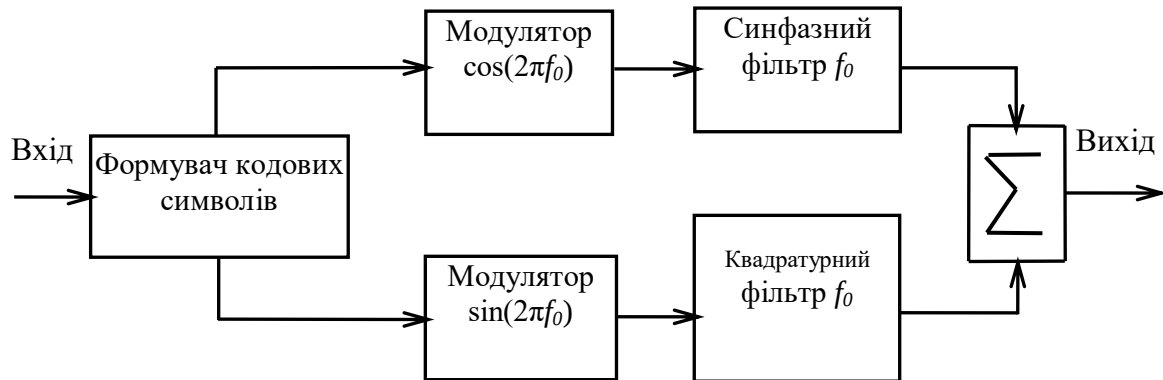


Рисунок 1.5 – Схема формування CAP-модульованого сигналу

Необхідне співвідношення сигнал/шум знаходиться в наступній залежності від конкретного способу, що використовується у CAP, таблиця 1.2.

Таблиця 1.2 – Співвідношення сигнал/шум для різних варіантів CAP

| Варіанти CAP | Необхідне співвідношення сигнал/шум, дБ |
|--------------|-----------------------------------------|
| CAP-4        | 14,5                                    |
| CAP-8        | 18,0                                    |
| CAP-16       | 21,5                                    |
| CAP-32       | 24,5                                    |
| CAP-64       | 27,7                                    |
| CAP-128      | 30,6                                    |
| CAP-256      | 33,8                                    |

Відповідно до визначення значення відносного співвідношення сигнал/шум відповідає рівню перешкоди, при якій ймовірність спотворення біта на приймальному боці не перевищуватиме значення  $10^{-7}$ . Як і у випадку КАМ,

стійкість до перешкод методу модуляції зменшується при підвищенні його спектральної ефективності.

Оскільки амплітудно-фазова модуляція з придушенням несущої є, по суті, квадратурно-амплітудною модуляцією, їй властиві всі позитивні якості, властиві цьому класу способів модуляції - відносна простота реалізації та висока спектральна ефективність. Безперечною перевагою власне CAP-модуляції є висока енергетична ефективність сигналу, що формується. Саме цей спосіб модуляції теоретично здатний забезпечити максимальні значення співвідношення сигнал/шум. Всі ці корисні якості CAP-модуляції дозволяють застосовувати її для побудови ефективних та економічних приймально-передавальних пристроїв широкого спектру технологій DSL.

### 1.3 Ефективність та завадостійкість QAM-N модуляції

Практично важливий висновок робіт Шеннона полягає в тому, що якщо швидкість передачі інформації менша за пропускну здатність каналу, то з використанням кодів, що виправляють помилки, можна створити систему зв'язку з якою завгодно малою ймовірністю помилки на виході декодера каналу. При цьому адекватна система без коригувального кодування буде більш складною, дорогою та енергоємною. Звідси висновок: система, яка не має коригувального кодування і працює без помилок, - це вкрай неефективна система. Навпаки, ефективна система повинна мати можливість роботи в режимі з досить високою частотою помилок у потоці на вході декодера, а декодований потік повинен мати вкрай малу ймовірність помилки на біт.

У контексті цього зауваження розглянемо ефективність та завадостійкість QAM-N модуляції з тим, щоб орієнтуватися на її потенційні характеристики з метою визначення доцільності застосування завадостійкого кодування [3-4].

Введення при кодуванні для виправлення помилок в інформаційний сигнал надлишкових символів супроводжується негативним ефектом - зниженням швидкості передачі корисного навантаження. Звідси випливає, що

для збереження швидкості передачі корисного навантаження необхідно розширення смуги частот каналу або підвищення кратності модуляції.

Позитивним ефектом завадостійкого кодування є зниження ймовірності помилки, або зниження енергетики передачі при тій же ймовірності помилки, або і те, і інше одночасно. Таким чином, кодування розширює можливості компромісу між смугою та енергетикою каналу, властивого будь-якій системі зв'язку.

### 1.3.1 Спектральна ефективність

Спектральна (частотна) ефективність цифрової системи значною мірою характеризує власне ефективність модуляційної схеми, оскільки поєднує інформаційну швидкість передачі інформації з шириною смуги пропускання каналу передачі. Визначається цей показник таким чином:

$$\gamma = R_b / B_w, \quad (1.5)$$

де  $R_b$  – швидкість передачі інформації, біт/с;  $B_w$  – повна смуга пропускання каналу, Гц.

Вимірюється спектральна ефективність числом бітів за секунду, що припадають на 1 Гц смуги каналу, тобто біт/(с•Гц).

У реальних умовах доступна смуга частот каналу  $B_w$  з тих чи інших причин може використовуватися не повністю, тому навіть досить ефективна система передачі в її конкретному застосуванні за цим критерієм оцінки буде неефективною. Іншими словами, потрібно мати на увазі, що фактично модуляційна схема за цим показником може оцінюватися через відповідне поєднання (1.5) швидкості передачі та ширини спектру модульованого сигналу. Тому, необхідно уточнити критерій спектральної ефективності, зв'язавши його зі смугою Найквіста  $B_N$  і коефіцієнтом заокруглення спектра  $\alpha$ , значення якого характеризує розширення практично займаної спектром сигналу смуги частот каналу  $B_L$  понад смугу Найквіста  $B_N$ . Смуга Найквіста, як відомо, враховує

ширину спектру, що замикається між першими «нулями» спектральної характеристики сигналу. Отже

$$B_L = B_N(1 + \alpha). \quad (1.6)$$

Відповідно реальна спектральна ефективність  $\mu$  різних схем модуляції, призначених для цифрової передачі, виражається формулою:

$$\mu = R_b/B_L = R_b/B_N(1 + \alpha). \quad (1.7)$$

В ідеальному випадку має місце повне використання всієї смуги пропускання каналу, коли  $B_W = B_L$ . Тоді показники ефективності  $\mu$  і  $\gamma$  збігаються, тобто виконується рівність  $\mu = \gamma$ .

Доцільно ввести також критерій потенційної спектральної ефективності конкретного методу модуляції (модуляційної схеми). Очевидно, цей показник слід визначати для випадку, коли має місце рівність  $B_W = B_L$  та  $\alpha = 0$ . Рівність нулю коефіцієнта заокруглення спектра  $\alpha$  означає відсутність у схемі модулятора формувальних фільтрів Найквіста.

Визначимо потенційну ефективність як [5]:

$$\gamma_0 = R_b/B_N. \quad (1.8)$$

Далі запишемо

$$\mu = \gamma_0/(1 + \alpha) \text{ або } \gamma_0 = \mu(1 + \alpha). \quad (1.9)$$

При використанні багатопозиційної цифрової модуляції, наприклад, QAM-N, при якій кожен символ передає  $\log_2(N)$  бітів вхідного цифрового потоку, швидкість передачі інформації визначається

$$R_b = \log_2(N)R_s, \quad (1.10)$$

де  $N$  – число елементів простору сигналів при цифровій модуляції (кількість різновидів символів або сумарне число точок на сузір'ї модуляційної схеми);

$R_s$  – швидкість передачі символів цифрового потоку.

Згідно з критерієм Найквіста максимальна швидкість передачі символів у каналі передачі смугової системи (ширина смуги  $B_W$ ) чисельно дорівнює

$$R_s = B_W / (1 + \alpha). \quad (1.11)$$

Отже, при  $B_W = B_L$

$$\mu = \log_2(N) / (1 + \alpha). \quad (1.12)$$

Звідси випливає, що для підвищення фактичної спектральної ефективності  $\mu$  необхідно збільшувати кратність модуляції (значення позиційності)  $\log_2(N)$  і одночасно знижувати значення коефіцієнта заокруглення спектра  $\alpha$ , тим самим збільшуючи крутість зрізу спектра модулюючого сигналу.

При сучасному рівні стиснення сигналів зображення для передачі однієї програми телебачення або кількох програм стандартної якості потрібна швидкість потоку близько 20 Мбіт/с. Для узгодження цієї швидкості зі стандартними смугами частот 6, 7 і 8 МГц існуючих у світі ТВ каналів, необхідно застосовувати поєднання багатопозиційної модуляції з системою завадостійкого кодування. У нормальних умовах системні компроміси забезпечуються при спектральній ефективності близько 4 біт/(с•Гц). Однак при недостатній завадостійкості каналу зв'язку доводиться знижувати кратність модуляції і підвищувати надмірність через збільшення частки символів коригуючого кодування. При цьому знижується відповідно пропускна здатність

і, як наслідок, падає спектральна ефективність. Залежно від кратності модуляції та кодових швидкостей, прийнятих у цифровому наземному телевізійному мовленні, значення спектральної ефективності можуть змінюватися в достатньо широких межах, що відображено у таблиці 1.3 для деяких типових випадків використання різних модуляційних схем у каналі зі смугою 8 МГц.

Таблиця 1.3 – Спектральні ефективності

| Кодова швидкість | Спектральна ефективність модуляції біт/(с.Гц) |        |        |
|------------------|-----------------------------------------------|--------|--------|
|                  | QPSK                                          | QAM-16 | QAM-64 |
| $\frac{1}{2}$    | 0,64                                          | 1,24   | 1,87   |
| $\frac{2}{3}$    | 0,83                                          | 1,66   | 2,49   |
| $\frac{3}{4}$    | 0,93                                          | 1,87   | 2,80   |
| $\frac{5}{6}$    | 1,04                                          | 2,07   | 3,11   |
| $\frac{7}{8}$    | 1,09                                          | 2,13   | 3,27   |

Можна зазначити, що наведені у таблиці 1.3 значення спектральної ефективності достатньо далекі від теоретичних чи ідеальних. Наприклад, ідеально при модуляції QAM-64 кожен символ передає 6 бітів інформації, що могло б визначати його спектральну ефективність. Можна побачити дещо менші цифри, причому має місце очевидна залежність від способу кодування, тобто фактично – кількості надлишкових бітів завадостійкого кодування.

### 1.3.2 Енергетична ефективність

Показник енергетичної ефективності [3-5]

$$\beta = R_b N_0 / P_c, \quad (1.13)$$

де  $P_C$  - середня потужність модульованого сигналу;  $N_0 = kT$  – одностороння спектральна щільність потужності адитивного білого гаусового шуму (АБГШ) на вході приймального фільтра.

З врахуванням того, що

$$P_C = E_b R_b, \quad (1.14)$$

де  $E_b$  - енергія сигналу на біт інформації на вході приймального фільтра, одержуємо

$$\beta = N_0 / E_b. \quad (1.15)$$

Таким чином, коефіцієнт  $\beta$  – величина, що є зворотною відношення енергії на біт в сигналі, що передається, до щільності шуму на вході приймача.

При використанні у модемі узгодженої фільтрації та формуванні спектрів, згідно з критеріями Найквіста, енергетична ефективність  $\beta$  може бути виражена наступним чином [5-6]:

$$\beta = R_b N_0 B_N / P_C B_N. \quad (1.16)$$

Оскільки при узгодженій фільтрації по Найквісту шумова смуга приймача збігається зі смугою Найквіста, то потужність шуму на вході вирішувального пристрою дорівнює  $P_{ш} = N_0 B_N$ , при цьому відношення сигнал/шум  $q = P_C / P_{ш}$ , а  $\beta = R_b / q B_N$ .

Коефіцієнти  $\mu$  (спектральна ефективність) та  $\beta$  (показник енергетичної ефективності) взаємопов'язані. Підставляючи у формулу для  $\beta$  відношення  $R_b / B_N = \gamma_0 = \mu(1 + \alpha)$ , отримуємо

$$\beta = \mu(1 + \alpha)/q. \quad (1.17)$$

$$q = \mu(1 + \alpha)/\beta. \quad (1.18)$$

Як відомо, пропускна здатність (максимально можлива швидкість передачі інформації) частотно-обмеженого каналу з адитивним білим гауссівським шумом визначається формулою Шеннона:

$$C = \Delta F \log_2(1 + P_C/N_0\Delta F). \quad (1.19)$$

Тут під смугою пропускання системи  $\Delta F$  слід розуміти шумову смугу, яка дорівнює смузі Найквіста  $B_N$ . Гранично, якщо виконується умова теореми, то бітова швидкість стає рівною пропускній здатності, тобто  $R_b = C$ . Тоді можна отримати співвідношення для верхньої межі енергетичної ефективності передачі інформації

$$R_b/B_N = \log_2(1 + q) = \log_2 \left[ 1 + \mu(1 + \alpha)/\beta \right], \quad (1.20)$$

$$\mu(1 + \alpha) = \log_2 \left[ 1 + \mu(1 + \alpha)/\beta \right]. \quad (1.21)$$

Звідси можна знайти формулу для енергетичної ефективності  $\beta$ , як функції реальної спектральної ефективності  $\mu$  і коефіцієнта заокруглення спектра  $\alpha$

$$\beta = \frac{\mu(1+\alpha)}{(2^{\mu(1+\alpha)}-1)}. \quad (1.22)$$

Отриманий аналітичний вираз показує, що при збільшенні спектральної ефективності  $\mu$  та коефіцієнта заокруглення спектра  $\alpha$  енергетична

ефективність зменшується. Це означає, що застосування модуляційних схем з високим рівнем позиційності вимагає збільшення енергії сигналу.

### 1.3.3 Завадостійкість квадратурної амплітудної модуляції

З метою отримання порівняльних характеристик розглянемо питання завадостійкості для квадратурної фазової модуляції QPSK та квадратурної амплітудної модуляції QAM-N достатньо високого рівня позиційності.

QPSK демодуляцію можна пов'язати з демодуляцією BPSK, якщо мати на увазі, що в QPSK потрібно використати не одну опорну несущу (при когерентній демодуляції), а дві ортогональні несущі. Тому звернемося спочатку до BPSK-модуляції.

Імовірність бітової похибки для BPSK при впливі шуму на модульований сигнал на виході приймального фільтра визначається виразом [7]:

$$P_b = \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} \int_A^\infty e^{-\left(\frac{x^2}{2N}\right)} dx = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{A^2}{2N}} \right), \quad (1.23)$$

де  $A$  – амплітуда обвідної сигналу BPSK у момент рішення на виході приймального фільтра;  $N$  – потужність шуму.

При використанні в якості приймального фільтра узгодженого фільтра значення  $\frac{A^2}{2N}$  досягає максимуму і стає рівним  $E_b/N_0$

$$\frac{A^2}{2N} = E_b/N_0, \quad (1.24)$$

де  $E_b$  – енергія, що припадає на один біт вхідного фазомодульованого сигналу.

У разі когерентної QPSK процес демодуляції еквівалентний когерентному детектуванню сигналу BPSK, рівень якого на 3 dB нижче, ніж у сигналу QPSK, за умови, що вхідний сигнал QPSK когерентно детектується

парою опорних несущих, які ортогональні між собою і мають зсув на  $45^\circ$  відносно фаз вхідного сигналу.

Тоді ймовірність помилки на біт для сигналу QPSK становитиме

$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{A^2}{4N}} \right). \quad (1.25)$$

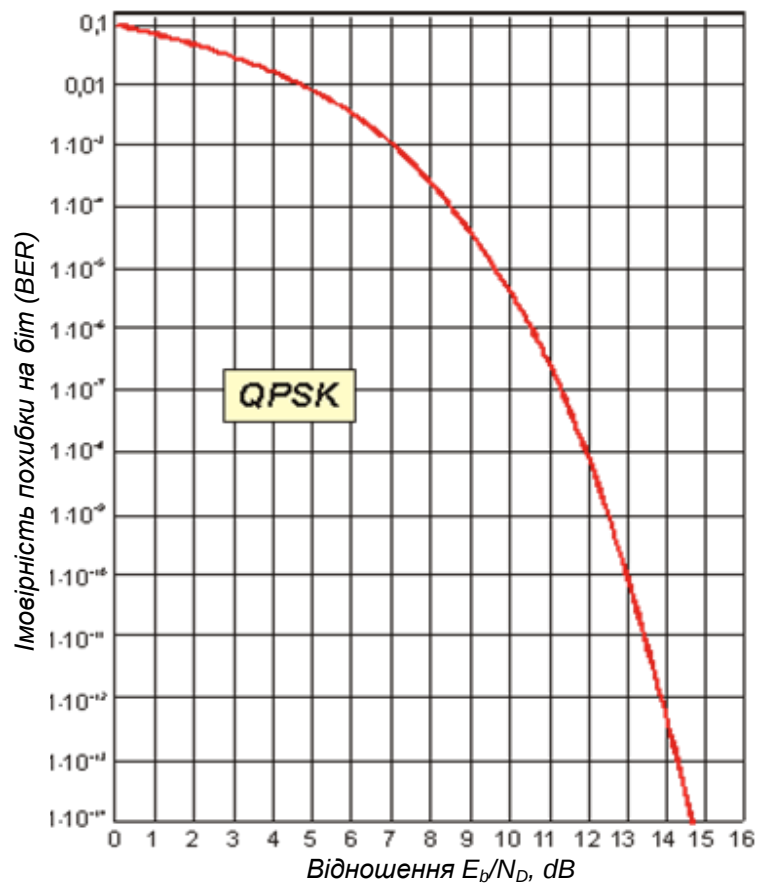


Рисунок 1.6 – Залежність ймовірності бітової похибки

для QPSK-модуляції від співвідношення  $E_b/N_0$

При використанні у якості вхідного приймального фільтра узгодженого фільтра діє рівність

$$\frac{A^2}{4N} = E_b / 2N_0. \quad (1.26)$$

Тут  $E_b$  – енергія символу сигналу ФМ на вході приймального фільтра.

Оскільки символ сигналу QPSK на відміну символу сигналу BPSK складається з 2 бітів, то  $E_s = E_b$  для сигналу BPSK, і  $E_s = 2E_b$  для сигналу QPSK. Отже, формули (1.24) та (1.26) чисельно рівні одна одній, і ймовірність помилки на біт при когерентному прийомі сигналу QPSK є функцією  $E_b/N_0$ , як і для сигналу когерентної BPSK. Таким чином, модуляція QPSK забезпечує найкращий компроміс за критерієм потужність-смуha.

Крім того, сигнали ФМ піддаються малим спотворенням при сильній нелінійності каналу. Це визначає переважне застосування сигналів з модуляцією ФМ для різних телекомунікаційних систем, які працюють в умовах з достатньо значним рівнем шуму.

Характеристика імовірності бітової похибки для QPSK-модуляції в залежності від співвідношення  $E_b/N_0$  при когерентному детектуванні наведена на рисунку 1.6.

Тепер розглянемо квадратурну амплітудну модуляцію.

Імовірність похибки при прийомі символу для багатопозиційної квадратурної амплітудної модуляції QAM-N визначається у загальному вигляді [5, 7]:

$$P_e = \frac{1}{\log_2(N)} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{N}} \right) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2(N) E_b}{2(N-1) N_0}} \right) \right] \right] \right\}. \quad (1.27)$$

Графіки потенційної завадостійкості найбільш поширених видів модуляції QAM-16 і QAM-64 як функції від відношення  $E_b/N_0$  наведені на рисунку 1.7. На цьому рисунку також зображена крива завадостійкості для модуляції QPSK.

Іноколи зручніше використати як аргумент відношення сигнал/шум  $C/N$ , (у знаменнику енергія шуму, а не його спектральна щільність). Для перерахунку відношення  $E_b/N_0$  у відношення  $C/N$  можна скористатись таким виразом:

$$C/N = \frac{E_b}{N} = E_b/N_0 \log_2(N). \quad (1.28)$$

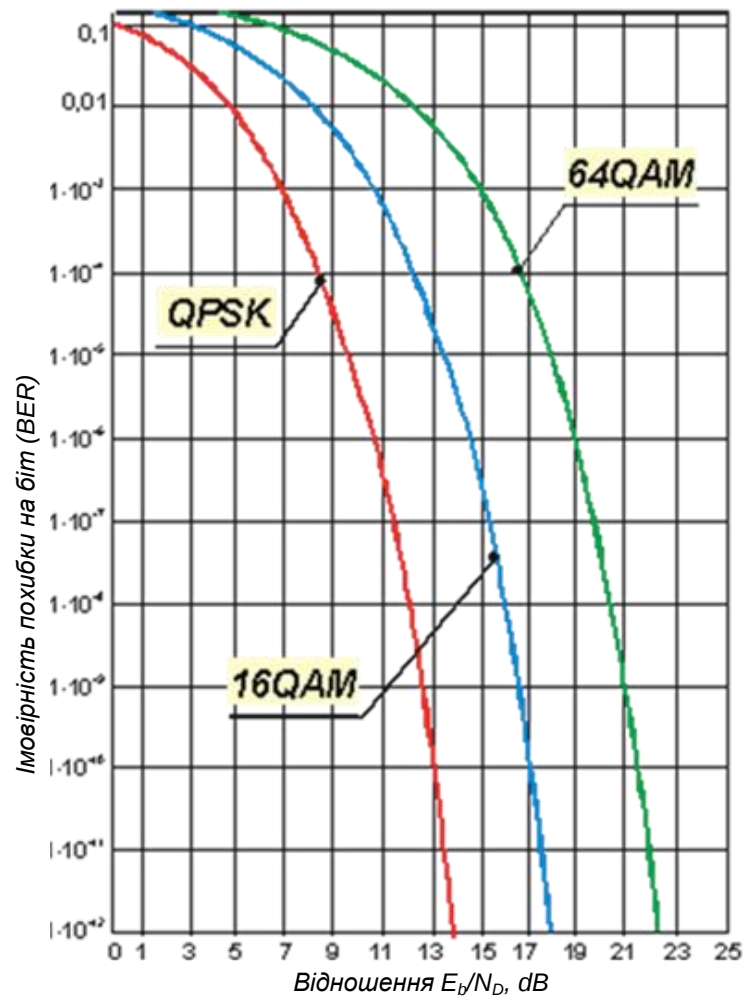


Рисунок 1.7 – Графіки потенційної завадостійкості найбільш поширених видів модуляції QAM-16 і QAM-64 як функції від відношення  $E_b/N_0$

Криві завадостійкості у цьому випадку розраховуються також за формулою (1.27) після підстановки у неї (1.28). Результати розрахунків наведені на рисунку 1.8 [7, 8].

У системах з завадостійким кодуванням необхідно врахувати зниження енергії через введення у груповий потік додаткових символів для перевірки. У цьому випадку формула (1.28) прийме вигляд

$$C/N = E_b/N_0 \log_2(N) R, \quad (1.29)$$

де  $R$  – кодова швидкість.

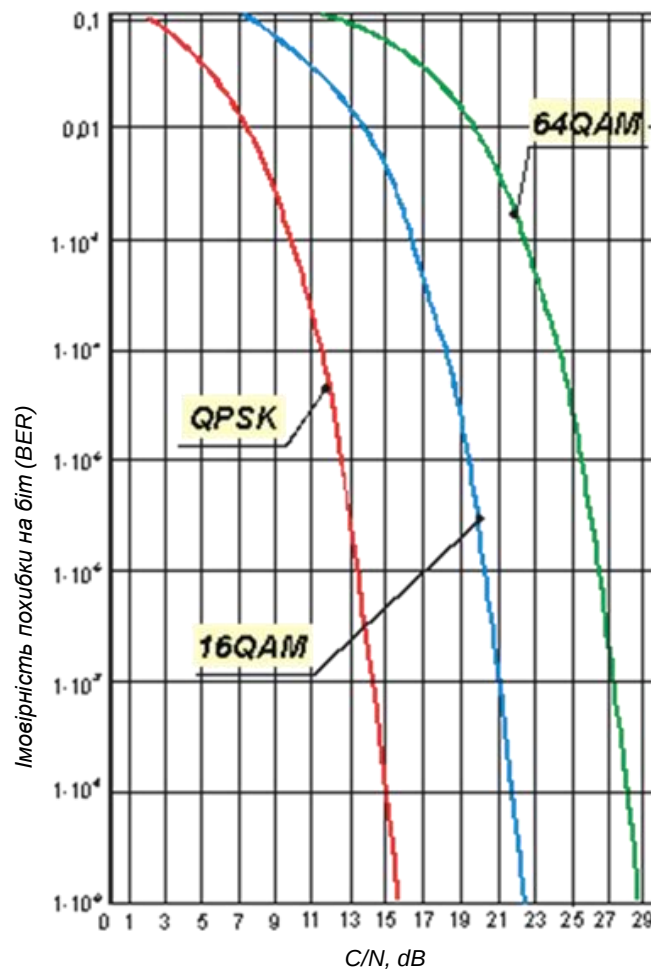


Рисунок 1.8 – Графіки завадостійкості модуляції QAM-16 і QAM-64 залежно від відношення  $C/N$

Наведені графіки характеризують очікуваний результат – найменш завадостійкою з наведених є модуляція, що має найбільшу позиційність, а саме QAM-64. Зазначимо також, що найбільшу визначеність дають криві ймовірності помилки у функції відношення  $E_b/N_0$ . Однак можна провести перерахунок і на відношення  $C/N$ .

#### 1.4 Висновки до розділу

Розглянуто математичні залежності для I/Q методу формування символів квадратурної амплітудної модуляції QAM-N. Кількість різновидів символів визначається кількістю розрядів у блоці кодової комбінації. Форма кодової комбінації визначає значення амплітуд синфазної та квадратурної компонент,

які формують вектор певної довжини (амплітуду символу) та фазу несущої у ньому. Показано, що знаки «плюс/мінус» амплітуд синфазної  $I_k$  та квадратурної  $Q_k$  компонент реалізуються зміною фази синусоїдальної та косинусоїдальної несущих на  $180^\circ$  у помножувачах модулятора. Множина значень амплітуд синфазної та квадратурної компонент мають відносний характер.

Показано, що сигнали ФМ та КАМ мають різну стійкість до перешкод, причому сигнали КАМ мають кращу завадостійкість. Це підтверджене шляхом геометричного трактування сузір'їв обох видів модуляції. Відстань  $d$  між сигнальними точками у ФМ при однаковій нормованій потужності сигналу менша відстані між сигнальними точками в КАМ.

Зі збільшенням порядку модуляції зростає швидкість передачі інформації, тобто сигнал може нести більше біт інформації на символ. Число біт, що передаються одним станом (символом), визначається  $L = \log_2 N$ , де  $L$  – рівень модуляції. Збільшення швидкості передачі даних зі збільшенням порядку модуляції відбувається на шкоду завадостійкості. Схеми модуляції вищого порядку значно менш стійкі до шумів і перешкод.

Показано принципи формування КАМ-сигналу з придушенням несущої. Оскільки амплітудно-фазова модуляція з придушенням несущої є, по суті, квадратурно-амплітудною модуляцією, їй властиві всі позитивні якості, властиві цьому класу способів модуляції - відносна простота реалізації та висока спектральна ефективність. Безперечною перевагою власне САР-модуляції є висока енергетична ефективність сигналу, що формується. Саме цей спосіб модуляції теоретично здатний забезпечити максимальні значення співвідношення сигнал/шум.

Виконано аналіз енергетичної та спектральної ефективності модуляційної схеми QAM-N. Для підвищення спектральної ефективності  $\mu$  необхідно збільшувати кратність модуляції (значення позиційності)  $\log_2(N)$  і одночасно знижувати значення коефіцієнта заокруглення спектра  $\alpha$ , тим самим збільшуючи крутість зрізу спектра модулюючого сигналу. Практичні значення спектральної ефективності достатньо далекі від теоретичних чи ідеальних.

Наприклад, ідеально при модуляції QAM-64 кожен символ передає 6 бітів інформації, що могло б визначати його спектральну ефективність. На практиці маємо дещо менші цифри, причому має місце очевидна залежність від способу кодування – кількості надлишкових бітів у цифровому потоці.

Отримані аналітичні залежності показують, що спектральна і енергетична ефективності тісно пов'язані між собою. При збільшенні спектральної ефективності  $\mu$  та коефіцієнта заокруглення спектра  $\alpha$  енергетична ефективність зменшується. Це означає, що застосування модуляційних схем з високим рівнем позиційності вимагає збільшення енергії сигналу.

Проведений аналіз завадостійкості показав очікуваний результат – при збільшенні рівня позиційності на фоні підвищення спектральної ефективності відбувається зменшення завадостійкості.

## 2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНИХ СХЕМ ТА АЛГОРИТМІВ РОБОТИ МОДУЛЯТОРА/ДЕМОДУЛЯТОРА QAM-N-СИГНАЛУ

### 2.1 Система цифрового зв'язку

Система цифрового зв'язку може використовуватися для передавання аналогових повідомлень (у цьому випадку до складу системи входить АЦП – аналого-цифровий перетворювач) або вхідним сигналом для неї вже є цифровий потік певної швидкості. З точки зору функціонування модулятора QAM обидва варіанти підпадають під цифровий формат. Такі системи найширше застосовуються для передачі даних системами радіозв'язку, зокрема, такими як передбачено стандартами LTE, 802.16 та 802.11 [8].

Квадратурна амплітудна модуляція QAM в радіокомунікаційних додатках цифрових систем передачі здатна реалізувати більш високі швидкості передачі даних, ніж звичайні схеми з амплітудною модуляцією і схеми з фазовою модуляцією.

Базові сигнали мають лише дві позиції, які дозволяють їх передавати - або 0, або 1. QAM оперує зі значно більшою кількістю точок, кожна з яких має певні значення фази та амплітуди. Це відомо як діаграма сузір'я. Різним позиціям відповідають різні кодові комбінації вхідного потоку, тому один сигнал (символ) може передавати дані з більшою швидкістю.

Точки у сузір'ї зазвичай розташовуються у вигляді квадратної сітки з рівним інтервалом по горизонталі та вертикалі. Число точок дорівнює ступеню 2, тобто 4, 16, 64, ... , що є ознакою позиційності модуляції QAM-16, QAM-64, QAM-256 тощо.

Використовуючи формати модуляції вищого порядку, тобто більше точок у сузір'ї, можна передавати більше бітів на символ. Однак при цьому точки розташовані ближче одна до одної, тому вони більш сприйнятливі до шуму та помилок даних.

Перевага при застосуванні форматів вищого порядку (більшої позиційності QAM) у тому, що у сузір'ї більше точок, отже, можна передавати більше бітів на символ. Недоліком є те, що точки сузір'я знаходяться ближче одна до одної, тобто у цілому канал передачі є більш чутливим до шуму. У результаті версії QAM вищого порядку використовуються лише за досить високих співвідношень сигнал/шум.

Квадратурна амплітудна модуляція QAM-N, як зазначалось вище, характеризується високою спектральною ефективністю, але не позбавлена певних недоліків.

По-перше, модуляція QAM-N більш чутлива до шуму, оскільки різновиди символів за своїми параметрами наближаються один до одного, якщо зростає рівень позиційності, тому для ідентифікації сигналу у будь-якій точці прийняття рішення потрібен нижчий рівень шуму. Приймачі для використання з фазовою або частотною модуляцією можуть використовувати підсилювачі-обмежувачі, які через безболісне обмеження амплітуди здатні видаляти будь-які амплітудні шуми і, таким чином, зменшувати шумову залежність. Це не так з QAM.

Друге обмеження пов'язане також із компонентом амплітуди сигналу. Для сигналів з фазовою або частотною модуляцією підсилення в радіопередавачі не потребує використання лінійних підсилювачів, в той час як при використанні QAM, для якої інформація заноситься і в амплітуду, і в фазу, лінійність повинна бути збережена. На жаль, лінійні підсилювачі менш ефективні і споживають більше енергії, і це робить їх менш привабливими для мобільних додатків.

Таким чином, вищі швидкості передачі даних і вищі рівні спектральної ефективності системи радіозв'язку, які характерні для рівнів модуляції вищого порядку QAM-N, даються не просто. Схеми модуляції вищого порядку значно менш стійкі до шумів та перешкод.

В результаті цього багато систем радіозв'язку в даний час використовують динамічні адаптивні методи модуляції. Їх робота базується на тому, що вони аналізують стан каналу та адаптують схему модуляції, щоб

отримати найвищу швидкість передачі даних для заданих умов. При цьому вводиться більш досконалий алгоритм роботи: якщо відношення сигнал/шум зменшується, а помилки збільшуються, то система забезпечує повторну відправку даних, уповільнюючи таким чином пропускну здатність. Можна повернутись до схеми модуляції нижчого порядку. Тоді зв'язок можна зробити більш надійним з меншою кількістю помилок даних.

У контексті використання модуляційної схеми QAM-N розглянемо побудову системи цифрового зв'язку для випадку використання модуляції QAM-16, рисунок 2.1 [7-9].

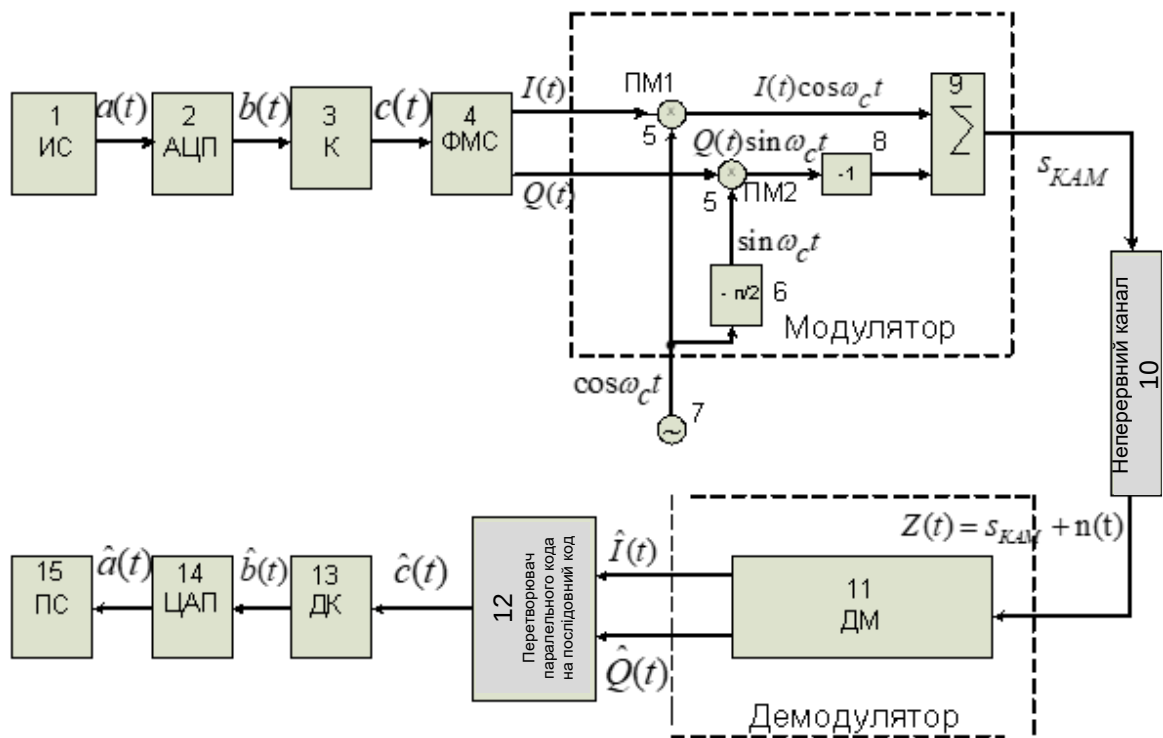


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи цифрового зв'язку

Призначення функціональних вузлів схеми.

- 1 – джерело повідомлень;
- 2 – аналого-цифровий перетворювач;
- 3 – кодер;
- 4 – формувач модуляційних синфазної та квадратурної амплітуд, включаючи попереднє перетворення послідовного коду в паралельний;

- 5 – помножувачі;
- 6 – фазообертач;
- 7 – генератор гармонійних коливань (несущої);
- 8 – інвертор;
- 9 – суматор;
- 10 – канал передачі;
- 11 – демодулятор;
- 12 – перетворювач паралельного коду в послідовний;
- 13 – декодер;
- 14 – цифро-аналоговий перетворювач;
- 15 – отримувач повідомлень.

Джерело повідомлень (ДП) виробляє реалізації  $a(t)$ , які надходять на аналого-цифровий перетворювач (АЦП).

АЦП перетворює реалізації аналогового (неперервного) повідомлення  $a(t)$  у цифрову форму – в потік двійкових символів. Це виконується у три етапи. На першому етапі виконується дискретизація реалізації  $a(t)$  в часі. Підставою для цієї процедури є, як відомо, теорема Найквіста. На другому етапі виконується квантування відліків амплітуди по рівню. Для цього встановлюється певний дискрет (крок) квантування та нумеруються дозволені рівні цілими числами від нуля до максимального значення згідно з динамічним діапазоном сигналу. На третьому етапі значення відліків з десяткової форми переводяться у двійкову форму числення. На виході АЦП створюється сигнал у вигляді у вигляді двійкової цифрової послідовності.

Кодер (К) здійснює процедуру завадостійкого кодування.

Формувач модуляційних сигналів (ФМС) створює множину значень амплітуд синфазної та квадратурної компонент залежно від виду вхідної кодової комбінації. Очевидно, що множина цих значень залежить від позиційності модуляції QAM-N (значення N). Зазначимо також, що попередньо послідовний код перетворюється у паралельний.

Наступні вузли: помножувачі (ПМ), інвертор (-1), суматор, генератор гармонійних коливань та фазообертач входять до складу модулятора. Тут виконуються перетворення, що відповідають формулам (1.2 – 1.4). На виході суматора формується радіосигнал з модуляцією QAM-N, який передається каналом передачі.

Функція демодулятора (ДМ) – виділити з вхідного модульованого сигналу модуляційні сигнали – амплітуди синфазної та квадратурної компонент. Це фактично координати однієї з точок сузір'я. Зрозуміло, що ці координати відповідають переданій кодовій комбінації.

Перетворювач паралельного коду в послідовний формує цифрову послідовність, яка надходить на декодер (ДК). Тут відбувається повне очищення потоку від надлишкових бітів і цифровий потік подається на цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП). На його виході формується остаточний вихідний сигнал.

## 2.2 Структурна схема та алгоритм роботи модулятора QAM-N

Розглянемо, як приклад, побудову та алгоритм роботи модулятора QAM-64. Його структурна схема наведена на рисунку 2.2. Зазначимо, що у цій схемі перетворювач рівнів (формує модуляційні сигнали) виконано у вигляді ЦАП.

Випадковий цифровий потік  $S_{EX}(t)$  надходить на двобітовий перетворювач послідовного потоку в паралельний. На його виходах формуються парний та непарний цифрові потоки  $U_i(td)$  та  $U_q(td)$  відповідно. Часові діаграми наведені на рисунку 2.3.

Перший символ парного потоку надходить на вхід ЦАП у момент часу  $t = 0$ , перший символ непарного потоку - в момент часу  $t = 1$ . Для нормальної роботи модулятора необхідно, щоб початок парного та непарного потоків збігалося за часом. Тому парний потік затримується на один бітовий інтервал ( $T_s$ ) лінією затримки.

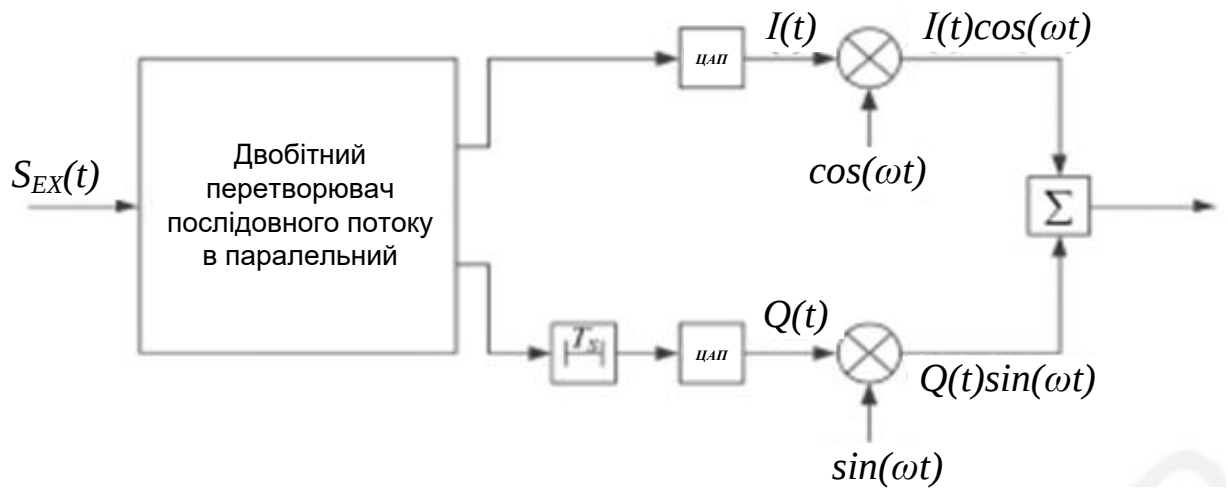


Рисунок 2.2 – Структурна схема модулятора QAM-64

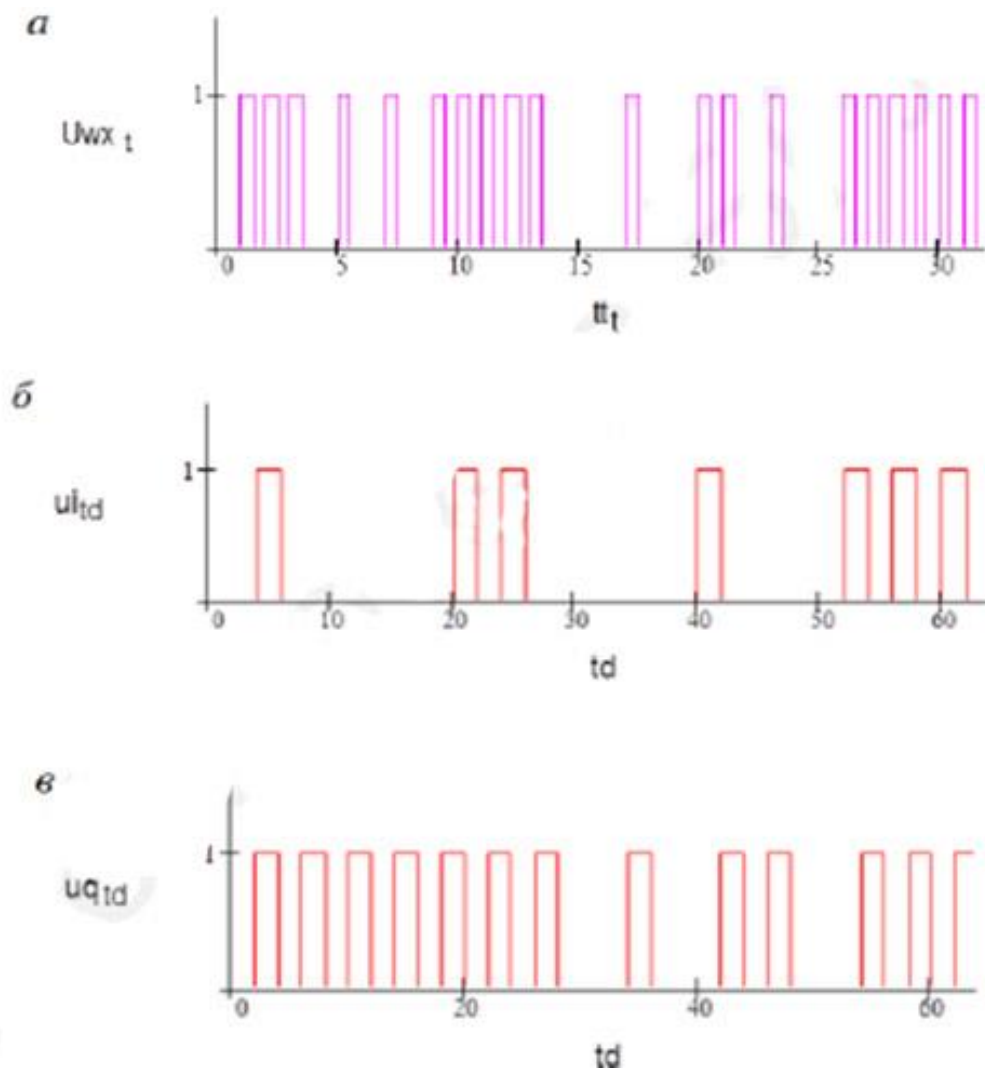


Рисунок 2.3 – Часові діаграми QAM-64

На рисунку 2.3 наведено:

- а) вхідний цифровий потік  $U_{WX}(t) \equiv S_{EX}(t)$ ;
- б) парний потік модулятора  $U_i(td)$ ;
- в) непарний потік модулятора  $U_q(td)$ .

На рисунку 2.4 показані часові залежності квадратурних сигналів на входах помножувачів. Це модуляційні сигнали, що відповідають значенням амплітуд синфазної та квадратурної компонент  $I(t)$  і  $Q(t)$ . Очевидно, що саме вони формують координати вектора на сигнальному сузір'ї. При зміні полярності векторів  $I(t)$  та  $Q(t)$  фази сигналів на виходах помножувачів змінюються на  $180^\circ$ .

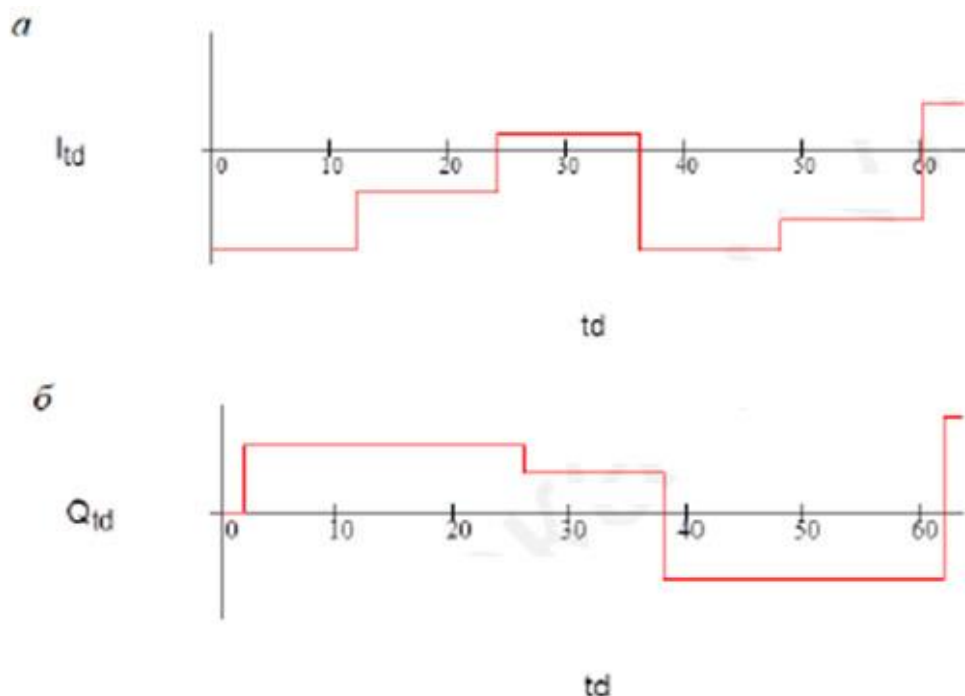


Рисунок 2.4 – Формування модуляційних сигналів

а – значення вектора  $I(t)$  (синфазна компонента);

б) – значення вектора  $Q(t)$  (квадратурна компонента)

Зі схеми, рисунок 2.2, видно, що модуляційні сигнали надходять на один із входів помножувачів. На виходах помножувачів формуються сигнали, які є амплітудно-модульованими, але з косинусною (синфазний канал) і синусною

(квадратурний канал) несущими. Модуляційними сигналами для них є вихідні сигнали АЦП, рисунок 2.4. Отже, вихідні сигнали помножувачів [10]:

$$I_{am}(t) = I(t) \cdot \cos(\omega t), \quad (2.1)$$

$$Q_{am}(t) = Q(t) \cdot \sin(\omega t). \quad (2.2)$$

На рисунках 2.5 і 2.6 наведено епюри вихідних сигналів помножувачів.

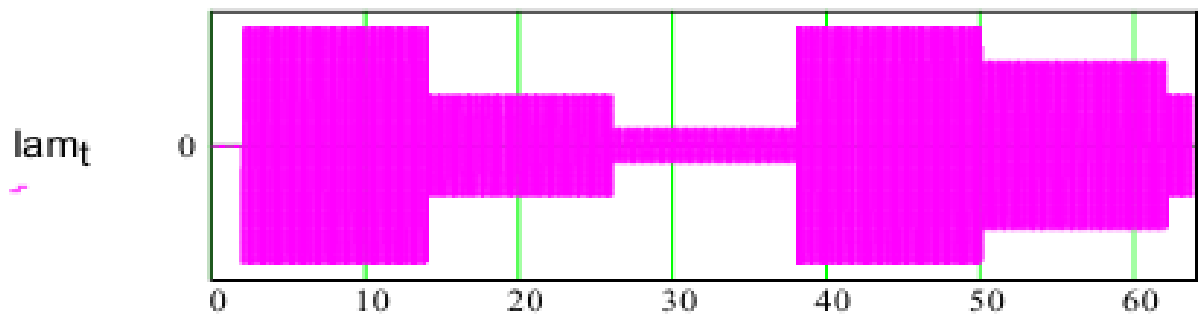


Рисунок 2.5 – Вихідний сигнал синфазного каналу

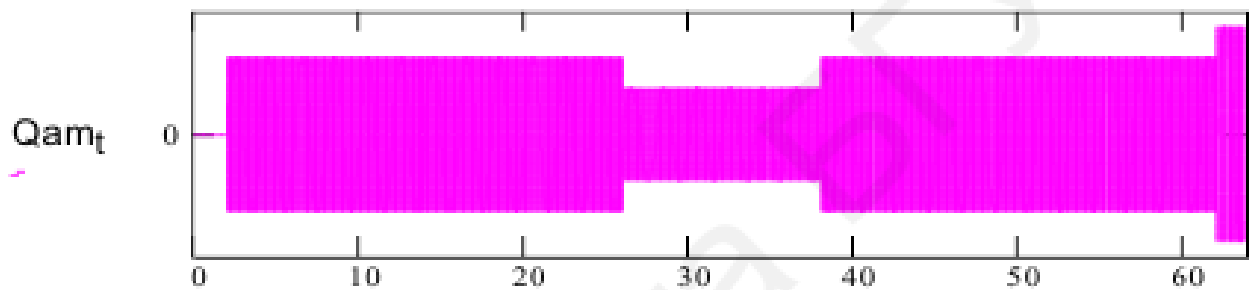


Рисунок 2.6 – Вихідний сигнал квадратурного каналу

В результаті підсумовування сигналів квадратурних каналів отримаємо вихідний сигнал модулятора – модульований сигнал QAM-64. Його аналітичний вираз

$$s_{QAM}(t) = I(t) \cdot \cos \omega_0 t + Q(t) \cdot \sin \omega_0 t. \quad (2.3)$$

На рисунку 2.7 наведена еюра вихідного сигналу модулятора, а на рисунку 2.8 – збільшений фрагмент такого сигналу.

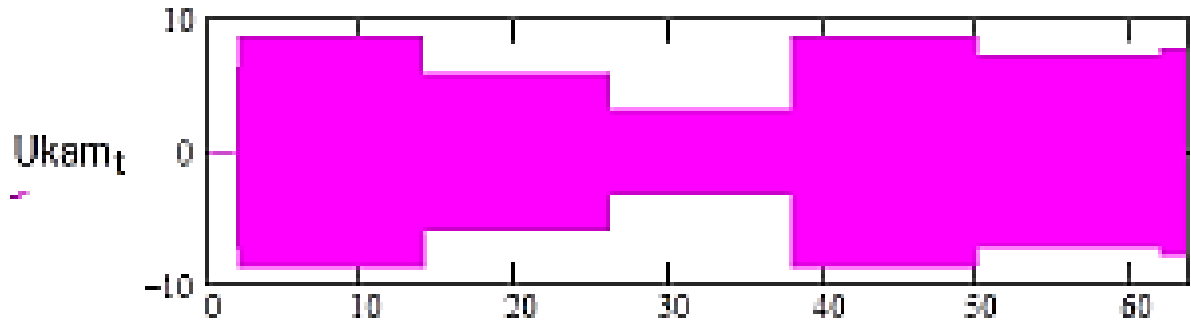


Рисунок 2.7 – Часова залежність вихідного сигналу модулятора QAM-64

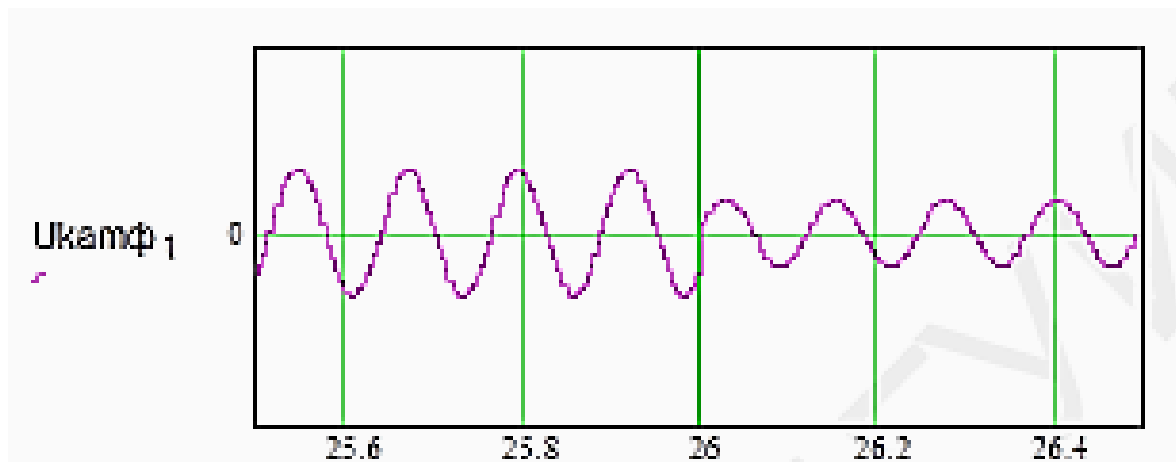


Рисунок 2.8 – Фрагмент часової залежності вихідного сигналу модулятора QAM-64

Незважаючи на те, що значення фаз сигналів синфазного та квадратурного каналів змінюються тільки на  $180^0$  і взагалі додаються у суматорі амплітудно-модульовані сигнали, фаза сигналу QAM-64 має 64 значення, які визначаються виразом (1.4). Амплітуда вектору модульованого сигналу визначається виразом (1.3). Очевидно, значень амплітуд вихідного сигналу менше, ніж значень фаз – значна частина символів мають однакову амплітуду і відрізняються лише фазами. Однакова амплітуда повторюється чотири рази, отже значень амплітуди для цієї модуляції – 16.

### 2.3 Структурна схема та алгоритм роботи демодулятора QAM-N

Також зосередимось на схемі демодулятора QAM-64. Розглянемо спрощену схему, рисунок 2.9, у загальному, а після цього – допоміжні вузли (функціональні модулі), що на рисунку 2.9 не показані, але їх наявність очевидна.

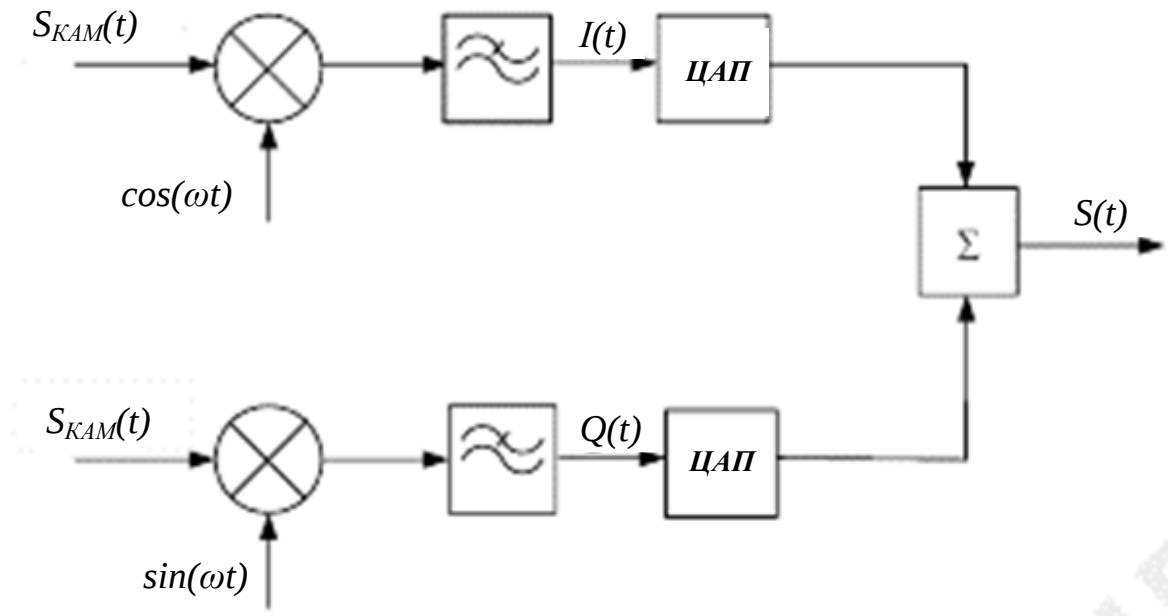


Рисунок 2.9 – Структурна схема демодулятора QAM

Вхідним сигналом демодулятора є вихідний сигнал модулятора, який пройшов каналом зв'язку, у якому є в наявності шуми. Тому вхідний сигнал демодулятора може бути представлений у такому вигляді [10, 11]:

$$U_{\text{вхD}}(t) = I(t) \cdot \cos \omega_0 t + Q(t) \cdot \sin \omega_0 t + r(t), \quad (2.4)$$

де  $r(t)$  – шуми каналу зв'язку.

Відповідно до структурної схеми демодулятора для роздільного виділення квадратурних складових  $I(t)$  і  $Q(t)$ , що містять інформацію про прийнятий цифровий потік (про шестирозрядну кодову комбінацію, яка передається кожним символом), вхідний сигнал повинен бути помножений на  $\cos \omega_0 t$  та  $\sin \omega_0 t$ . Зі схеми видно, у каналі виділення синфазної компоненти

множення відбувається на  $\cos\omega_0 t$ , а у каналі виділення квадратурної компоненти – на  $\sin\omega_0 t$ . Однак ці сигнали не можуть бути сформовані в демодуляторі за допомогою генераторів, тому що важливо мати їх синфазними з несущою, що формується на передачі, тобто у модуляторі. Тому ці сигнали формуються з прийнятого вхідного сигналу за допомогою блоку відновлення несущої частоти, структуру якого та алгоритм роботи розглянемо нижче. ФНЧ виконує математичну операцію інтегрування сигналів, тому сигнал на виході ФНЧ синфазного каналу демодулятора дорівнює

$$U_{I(t)} = \int_0^T [I(t) \cdot \cos\omega_0 t + Q(t) \cdot \sin\omega_0 t + r(t)] \cos\omega_0 t dt. \quad (2.5)$$

Сигнал на виході ФНЧ квадратурного каналу демодулятора

$$U_{Q(t)} = \int_0^T [I(t) \cdot \cos\omega_0 t + Q(t) \cdot \sin\omega_0 t + r(t)] \sin\omega_0 t dt. \quad (2.6)$$

Значення амплітуд  $I(t)$  і  $Q(t)$  на інтервалі інтегрування (тривалість символу) постійні. Вони виносяться з-під знаку інтеграла. Функції  $\cos$  і  $\sin$  є ортогональними, отже, інтеграл від їх добутку дорівнює нулю. Таким чином

$$U_{\text{ФНЧ}I(t)} = 0,5I(t) + r(t)I(t), \quad (2.7)$$

$$U_{\text{ФНЧ}Q(t)} = 0,5Q(t) + r(t)Q(t), \quad (2.8)$$

де  $r(t)I(t)$  та  $r(t)Q(t)$  – значення потужностей шуму на виходах відповідно синфазного та квадратурного каналів демодулятора.

Напруги (2.7) і (2.8) надходять на входи відповідних АЦП, які згідно з алгоритмом, наведеним у таблиці 2.1, формують кодові комбінації, що є складовими частинами цифрового потоку (вихідного сигналу демодулятора).

Таблиця 2.1 – Значення напруги, що відповідає комбінаціям бітів вхідного цифрового потоку у коді Грея

| Кодове слово | Вихідна напруга |
|--------------|-----------------|
| 110          | +7              |
| 111          | +5              |
| 101          | +3              |
| 100          | +1              |
| 000          | -1              |
| 001          | -3              |
| 011          | -5              |
| 010          | -7              |

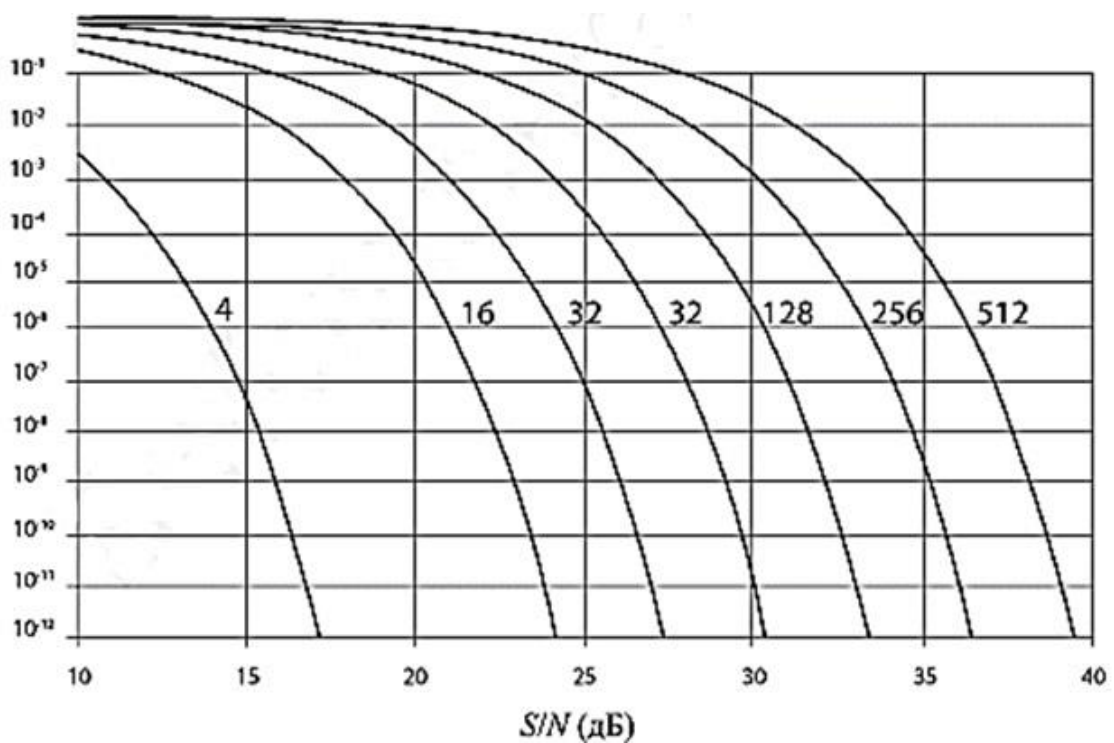


Рисунок 2.10 – Коефіцієнт бітових помилок залежно від відношення сигнал/шум для різних значень позиційності як параметра

За наведеним у таблиці 2.1 алгоритмом працюють обидва канали демодулятора – і синфазний, і квадратурний. Мультиплексор (на схемі суматор)

об'єднує символи (біти) синфазного та квадратурного каналів і забезпечує відновлення цифрового потоку на виході демодулятора.

Наявність шумів у каналі зв'язку приводить до виникнення помилок. Залежності імовірності помилки від відношення сигнал/шум показані на рисунку 2.10. Більша позиційність модуляції QAM-N потребує для однакового значення імовірності помилок більшого співвідношення сигнал/шум.

Наведемо ще одну структурну схему когерентного демодулятора КАМ-сигналів. Вона зображена на рисунку 2.11. Схема цікава тим, що за її допомогою можна демодулювати КАМ-сигнал високої позиційності.



Рисунок 2.11 – Структурна схема когерентного демодулятора КАМ-сигналів

Видно, що на відміну від схеми, рисунок 2.9, ця структура доповнена блоком відновлення несучої частоти (обов'язковий елемент при когерентній демодуляції), блоком відновлення тактової частоти, двома ключами  $kT_c$  та багатопороговим вирішувальним пристроєм. Синхронізація роботи ключів забезпечує правильну реєстрацію амплітуд квадратурних складових, які порівнюються з порогами у багатопорогових вирішувальних пристроях. Остаточно встановлені амплітуди надходять на перетворювачі кодів (АЦП), де вони перетворюються у відповідні кодові комбінації, які мультиплексор об'єднує у вихідний цифровий потік.

## 2.4 Блок відновлення несущої частоти

Схема БВНЧ для когерентної демодуляції КАМ-сигналу наведена на рисунку 2.12, а. Склад схеми: смуговий фільтр (СФ) з частотою налаштування  $2\omega$ ; квадратор (Кв) для зведення радіосигналу  $S_{RF}$  у квадрат; дільник частоти (ДЧ) на два.

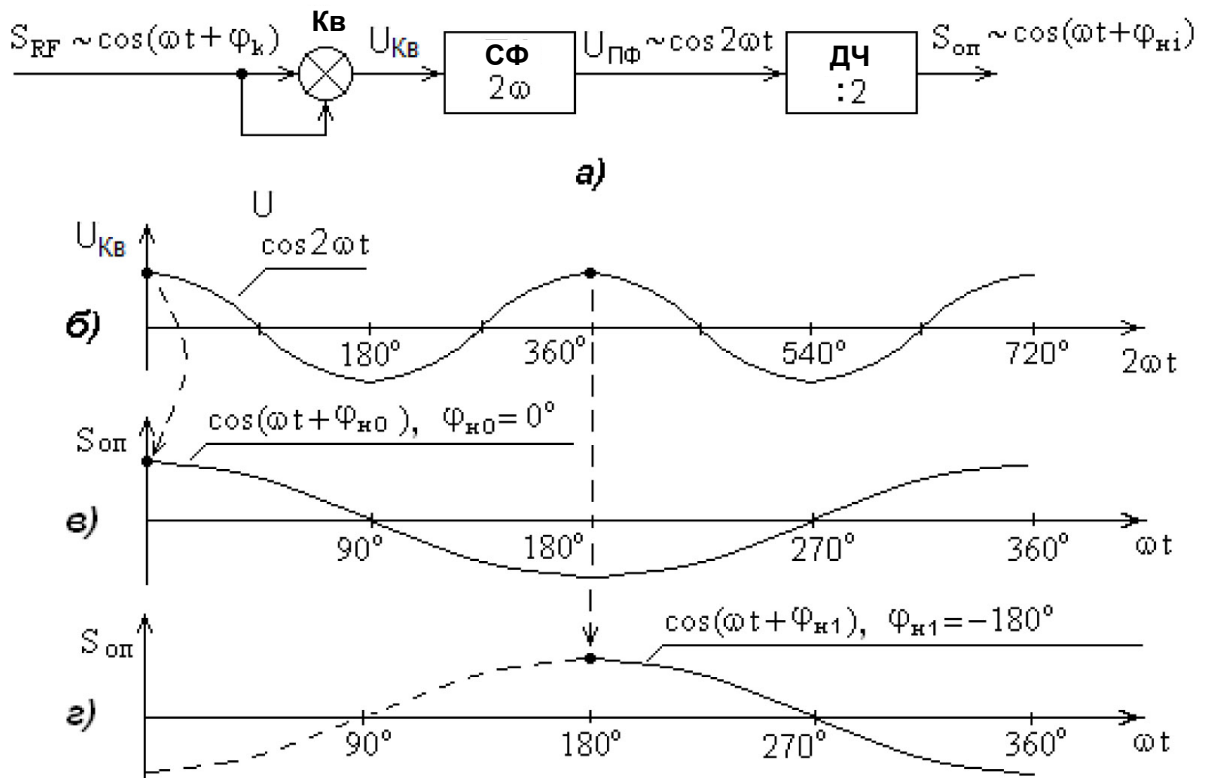


Рисунок 2.12 – Структурна схема БВНЧ (а);

епюри напруг щодо ефекту фазової неоднозначності, що виникає у БВНЧ:

вихідна напруга квадратора (б);

опорна напруга на виході ДЧ: при  $\varphi_{H0} = 0^\circ$  (в) та при  $\varphi_{H1} = -180^\circ$  (г)

Оскільки

$$\begin{aligned}
 U_{KB} &= S_{RF}^2 = \cos^2(\omega t + \varphi_k) = 1 + \cos(2\omega t + 2\varphi_k), \\
 \cos(2\omega t + 2\varphi_k) &= \cos 2\omega t \cos 2\varphi_k - \sin 2\omega t \sin 2\varphi_k, \\
 \cos 2\varphi_k &= 1, \sin 2\varphi_k = 0, \text{ при } \varphi_k = 0^\circ \text{ або } \varphi_k = 180^\circ,
 \end{aligned}$$

то вихідна напруга смугового фільтра СФ

$$U_{\text{СФ}} = \cos 2\omega t. \quad (2.9)$$

На виході БВНЧ утворюється опорне коливання з несучою частотою для синхронного детектування. Воно виникає після поділу частоти на два і може мати фазову неоднозначність  $\varphi_{\text{ні}}$  [12]:

$$S_{\text{оп}} = \cos(\omega t + \varphi_{\text{ні}}), \quad \varphi_{\text{ні}} = i(-180^\circ), \quad i = 0; 1. \quad (2.10)$$

Осцилограми, зображені на рисунку 2.12,б,в,г, пояснюють виникнення фазової неоднозначності  $\varphi_{\text{ні}}$ . Блок ДЧ може мати початкову синхронізацію у різні моменти, позначені крапками на рисунку 2.13,б.

Перевага розглянутої схеми БВНЧ – її простота.

Якщо відношення сигнал/шум (С/Ш) на вході приймача мале, то має місце «зашумленість» опорного коливання, що отримується. Цей недолік пов'язаний з тим, що опорна напруга формується власне з вхідної напруги, тобто є продуктом синтезу вхідної напруги. Тому приймач з такою схемою БВНЧ має гірші характеристики завадостійкості в порівнянні з приймачем, що містить схему БВНЧ з керованим генератором (УГ) та системою фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ).

## 2.5 БВНЧ з системою фазового автопідстроювання частоти

Структурна схема БВНЧ із системою фазового автопідстроювання частоти зображена на рисунку 2.13, а. Вона забезпечує квазікогерентну демодуляцію. Склад БВНЧ з ФАПЧ: смуговий фільтр (СФ), квадратор (КВ), перемножувач (Пм) та фільтр нижніх частот (ФНЧ), що утворюють фазовий детектор (ФД), керований генератор (КГ), фазообертач (ФВ) на  $90^\circ$ , дільник частоти (ДЧ) на два. Керований генератор охоплений петлею ФАПЧ із ФД.

Напругою помилки системи ФАПЧ ( $U_{err}$ ) є вихідна напруга ФД ( $U_{ФД}$ ):

$$U_{err} = U_{ФД}.$$

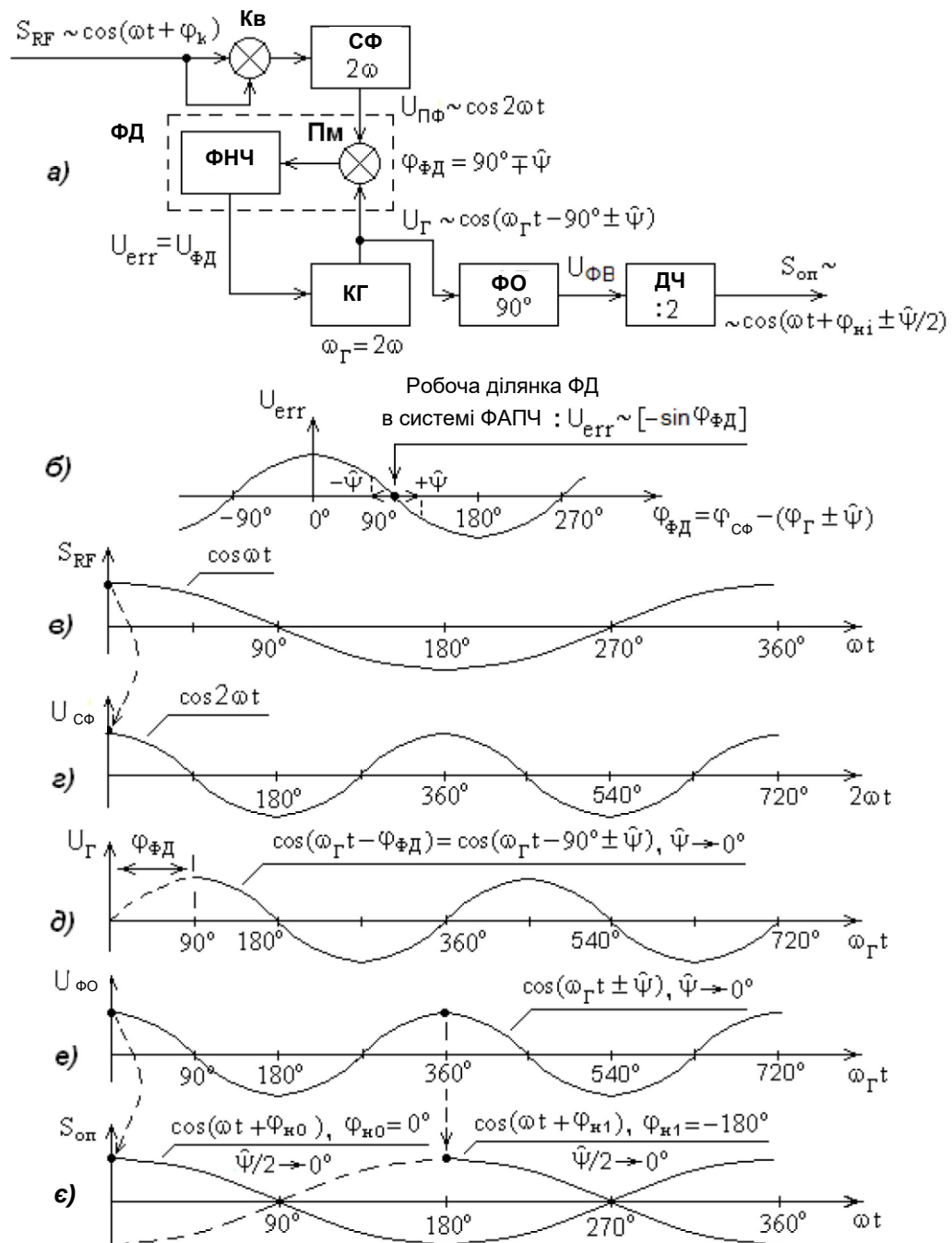


Рисунок 2.13 - Структурна схема БВНЧ з КГ(а);

детекторна характеристика ФД(б);

осцилограми напруг в характерних точках схеми (в - ж)

Відомо, що режиму «стеження» системи ФАПЧ відповідає робоча ділянка на детекторній характеристики ФД при різниці початкових фаз ( $\varphi_{\text{ФД}}$ ) вхідних напруг ФД ( $U_{\text{сф}}$  і  $U_{\Gamma}$ ) біля точки  $90^\circ$ , рисунок 2.13, а,б:

$$\varphi_{\text{ФД}} = [\varphi_{\text{сф}} - (\varphi_{\Gamma} \pm \hat{\theta})] = [0^\circ - (-90^\circ \pm \hat{\theta})] = 90^\circ \mp \hat{\theta}, \quad (2.11)$$

де  $\varphi_{\text{сф}}$  – початкова фаза напруги  $U_{\text{сф}}$ ;  $(\varphi_{\Gamma} \pm \hat{\theta})$  – початкова фаза напруги  $U_{\Gamma}$ ;  $\hat{\theta}$  – деяке зміщення початкової фази напруги  $U_{\Gamma}$ , що змінюється в режимі «стеження» системи ФАПЧ.

У режимі «стеження» системи ФАПЧ з урахуванням (2.11), рисунок 2.13д

$$U_{\Gamma} = \cos(\omega_{\Gamma}t - 90^\circ \pm \hat{\theta}).$$

Напруга на виході фазообертача, який вносить у напругу  $U_{\Gamma}$  фазу  $90^\circ$  має вигляд, рисунок 2.13,е

$$U_{\text{ФВ}} = \cos(\omega_{\Gamma}t \pm \hat{\theta}).$$

Опорне коливання  $S_{\text{оп}}$  у ДЧ піддається поділу частоти на два. При цьому можлива як фазова неоднозначність  $\varphi_{\text{ні}}$ , яка визначається формулою (2.10), так і зсув опорного коливання по фазі системою ФАПЧ на  $\hat{\theta}/2$ , рисунок 2.13, ж:

$$S_{\text{оп}} = \cos(\omega t + \varphi_{\text{ні}} \pm \hat{\theta}/2).$$

Однак зміщення напруги  $U_{\Gamma}$  по фазі незначне ( $\hat{\theta} \rightarrow 0$ ), отже і  $\hat{\theta}/2 \rightarrow 0$ , якщо забезпечена достатня крутість управління частотою КГ.

Таким чином, демодуляція радіосигналу при використанні зазначеного БВНЧ з ФАПЧ є квазікогерентною (з малим значенням  $\hat{\theta}/2 \rightarrow 0$ ), але з фазовою неоднозначністю  $\varphi_{hi}$  в опорному коливанні [6, 9]:

$$S_{оп} = \cos(\omega t + \varphi_{hi}). \quad (2.12)$$

## 2.6 Висновки до розділу

Проаналізовано алгоритм роботи цифрової системи зв'язку, яка використовує модуляційну схему QAM-N. Розглянуто роботу функціональних вузлів схеми. Показано, що в даний час системи використовують динамічні адаптивні методи модуляції. Їх робота базується на тому, що система аналізує стан каналу та адаптує до нього схему модуляції, щоб отримати найвищу швидкість передачі даних для заданих умов. З метою підтримки високої швидкості при складній завадовій обстановці вводиться більш досконалий алгоритм роботи системи: якщо відношення сигнал/шум зменшується, а помилки збільшуються, то система забезпечує повторну відправку даних, уповільнюючи таким чином пропускну здатність. Можна повернутись до схеми модуляції нижчого порядку. Тоді зв'язок можна зробити більш надійним з меншою кількістю помилок даних.

Запропоновано структурні схеми та алгоритми роботи модулятора і демодулятора модуляційної схеми QAM-N. Показано процедуру формування сигнальної діаграми шляхом використання синфазної та квадратурної компонент та зворотні перетворення у демодуляторі при використанні коду Грея. Наведено структурні схеми блоків відновлення несущої частоти, які є функціональними елементами когерентного (квазікогерентного) демодулятора, також обґрунтована необхідність використання багатопорогового вирішувального пристрою для оцінки значення амплітуд квадратурних компонент.

### 3 ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ МОДУЛЯЦІЇ QAM-N ВИСОКОЇ ПОЗИЦІЙНОСТІ

Квадратурна амплітудна модуляція QAM-N може мати різну позиційність: QAM-16, QAM-64, QAM-128, QAM-256, QAM-512, QAM-1024, QAM-2048, QAM-4096. Загальновідомо, що збільшення рівня позиційності дає можливість досягти більш високої швидкості передачі даних, але за рахунок збільшення співвідношення сигнал/шум.

Системи передачі вибирають різні порядки QAM залежно від стану каналу передачі. Якщо є хороший запас, більш високі порядки QAM можуть використовуватися для збільшення швидкості передачі даних, але якщо зв'язок погіршується, використовуються нижчі порядки, які вимагають меншої енергетики сигналу. При цьому зберігають низький рівень помилок по бітам.

У міру збільшення порядку QAM відстань між різними точками на діаграмі сузір'я зменшується, виникає більш висока ймовірність появи помилок даних. Щоб використовувати формати QAM високого порядку, передані символи повинні мати дуже хороше відношення  $E_b/N_o$ , інакше будуть присутні помилки даних. Коли  $E_b/N_o$  погіршується, то рівень потужності необхідно збільшити, або порядок QAM зменшити залежно від того, чи зберегти незмінною бітову помилку, чи швидкість передачі даних [10-12].

Відповідно, необхідно встановити баланс між швидкістю передачі даних та порядком модуляції QAM, потужністю та прийнятною частотою помилок по бітах. Хоча може бути введено додаткове виправлення помилок (завадостійке кодування), щоб зменшити вплив погіршення стану каналу. Це також зменшить швидкість передачі даних.

У деяких системах порядок позиційності модуляції є фіксованим. Зазвичай це характерно для систем без зворотного зв'язку. Навпаки, у системах зі зворотним зв'язком, можна адаптувати порядок позиційності модуляції для отримання найкращої пропускної спроможності для існуючого стану каналу передачі. Використовуваний рівень виправлення помилок також змінюється.

Таким чином, змінюючи порядок модуляції та виправлення помилок, можна оптимізувати швидкість передачі даних при збереженні необхідної частоти помилок.

Приклад використання фіксованого порядку позиційності. Модуляції QAM-64 та QAM-256 часто використовуються у додатках цифрового кабельного телебачення та кабельного модему. Порядок позиційності модуляції QAM повинен бути встановлений на передавачі, тому що передача реалізується лише одним способом, причому спрямована вона на тисячі приймачів, що унеможливорює використання адаптивної форми модуляції.

У Великій Британії QAM-16 і QAM-64 в даний час використовуються для цифрового наземного телебачення з використанням цифрового телебачення DVB. У США QAM-64 та QAM-256 є обов'язковими схемами модуляції для цифрового кабелю, які стандартизовані SCTE у стандарті ANSI/SCTE 07 2000.

Для багатьох видів бездротової та стільникової технології можливо динамічно змінювати порядок позиційності модуляції QAM та корекції помилок відповідно до стану каналу передачі між двома кінцями.

Зі зростанням швидкості передачі даних та підвищенням вимог до ефективності використання спектру зростає і складність технології адаптації лінії. Стан каналів даних передаються по стільниковому радіосигналу, щоб забезпечити швидку адаптацію модуляції, яка б відповідала переважній більшості ліній. Мета - забезпечення оптимальної пропускної спроможності даних, балансування потужності передавача, порядку QAM та прямого виправлення помилок тощо.

### 3.1 Аналіз діаграми-сузір'я при впливі дестабілізуючих чинників

На прикладі діаграми-сузір'я модуляції QAM-64 проаналізуємо вплив шуму на можливість ідентифікувати параметри вхідного сигналу - амплітуди синфазної та квадратурної компонент символу. При цьому зазначимо, що

процедура ідентифікації проводиться за допомогою багатопорогового вирішувального пристрою.

Кожна точка діаграми-сузір'я визначає положення кінця вектора, характеризуючи таким чином амплітуду символу та початкову фазу несущої у ньому. Можна говорити про певну кругову зону визначеності – область навколо кожної точки, у межах якої ідентифікація відбувається з високою імовірністю. Різноманітні зовнішні чинники впливають на положення точок діаграми-сузір'я, створюючи проблеми для їх правильної ідентифікації [9-12].

Ідеальний вигляд діаграми-сузір'я модуляції QAM-64 представлений на рисунку 3.1.

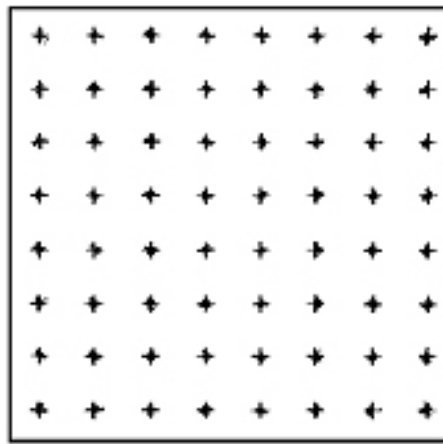


Рисунок 3.1 – Діаграма-сузір'я модуляції QAM-64

Зовнішній вигляд точок діаграми в межах своїх зон визначеності може надати важливу інформацію стосовно того, яким впливам піддався сигнал у процесі проходження каналом. Деякі типові випадки з їх діагностикою наведемо нижче.

Рисунок 3.2 – це ілюстрація поганого співвідношення сигнал/шум. Однозначність положення точок поки-що має місце, але подальша деградація сигналу призведе до повної розмитості картини. Помітно, що розмитість точок діаграми займає практично всі зони визначеності.

На рисунку 3.3 зображена інтермодуляційна картина. В каналі існує шум з явно вираженим спектральним складом у вигляді декількох частотних

компонент, близьких за частотою до частоти несущого коливання. Видно, що при цьому у кожній зоні визначеності утворюються концентричні кола.

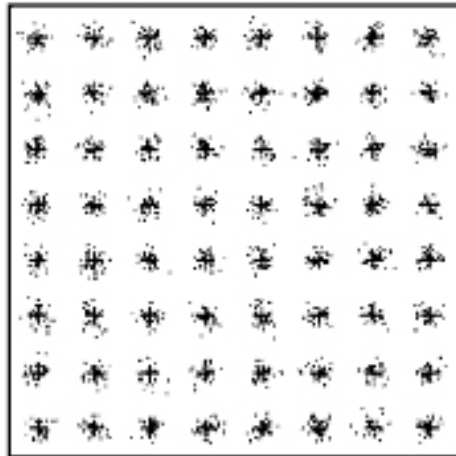


Рисунок 3.2 – Діаграма-сузір'я модуляції QAM-64 з критичним співвідношенням сигнал/шум

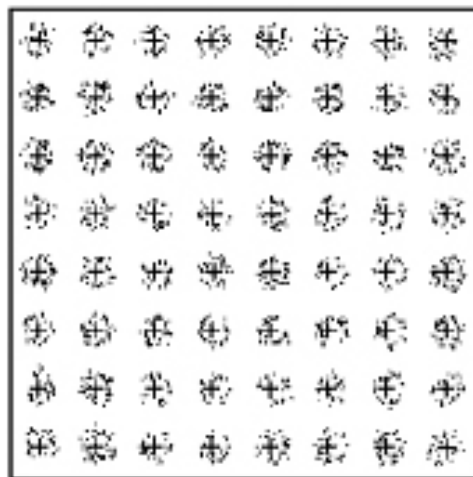


Рисунок 3.3 – Діаграма-сузір'я модуляції QAM-64 при наявності когерентного шуму

Розмитість зон визначеності по колу – наслідок впливу радіочастотних завад, що є проблемою передавального обладнання, рисунок 3.4. Цей вплив проявляється через неконтрольовані фазові зсуви. Точки у зонах визначеності розкидані таким чином, що складається враження ефекту сферичної симетрії відносно центру діаграми.

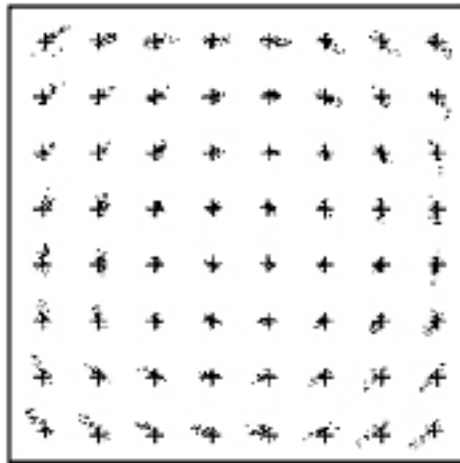


Рисунок 3.4 – Діаграма-сузір'я модуляції QAM-64  
при фазових зсувах

Рисунок 3.5 характеризує поведінку точок діаграми-сузір'я при нелінійності амплітудної характеристики каналу передачі. Причиною такої нелінійності є нелінійність проміжних та високочастотних підсилювачів, фільтрів, конверторів, еквалайзерів. Точки зміщуються відносно центрів зон визначеності по осям (відповідно до змін амплітуд синфазної  $I$  та квадратурної  $Q$  компонент), причому розмитість зростає при віддаленні від центру діаграми. Зазвичай причиною є модулятори головних станцій.

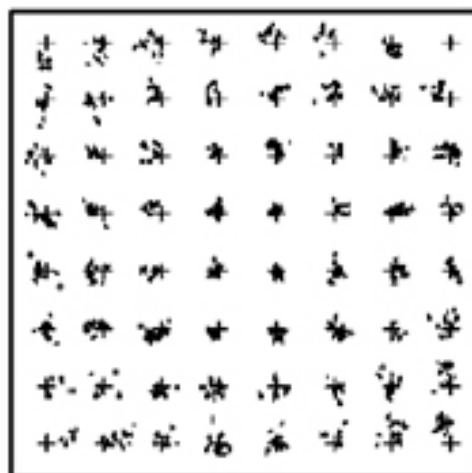


Рисунок 3.5 – Діаграма-сузір'я модуляції QAM-64  
при нелінійності амплітудної характеристики каналу передачі

Рисунок 3.6 демонструє результат впливу неточного значення частоти, тобто її зміщення у процесі формування символу. Причина частотного зсуву – дисбаланс у змішувачі модулятора або наявність паразитного постійного струму в системі передачі. Частотний зсув несущої проявляється у зміщенні точок діаграми в одному напрямку.

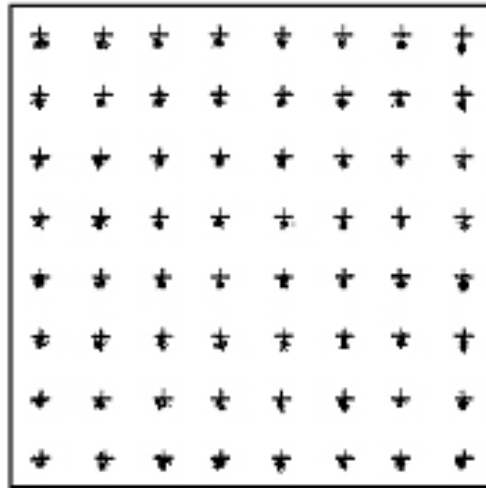


Рисунок 3.6 – Діаграма-сузір'я модуляції QAM-64 при відхиленні частоти

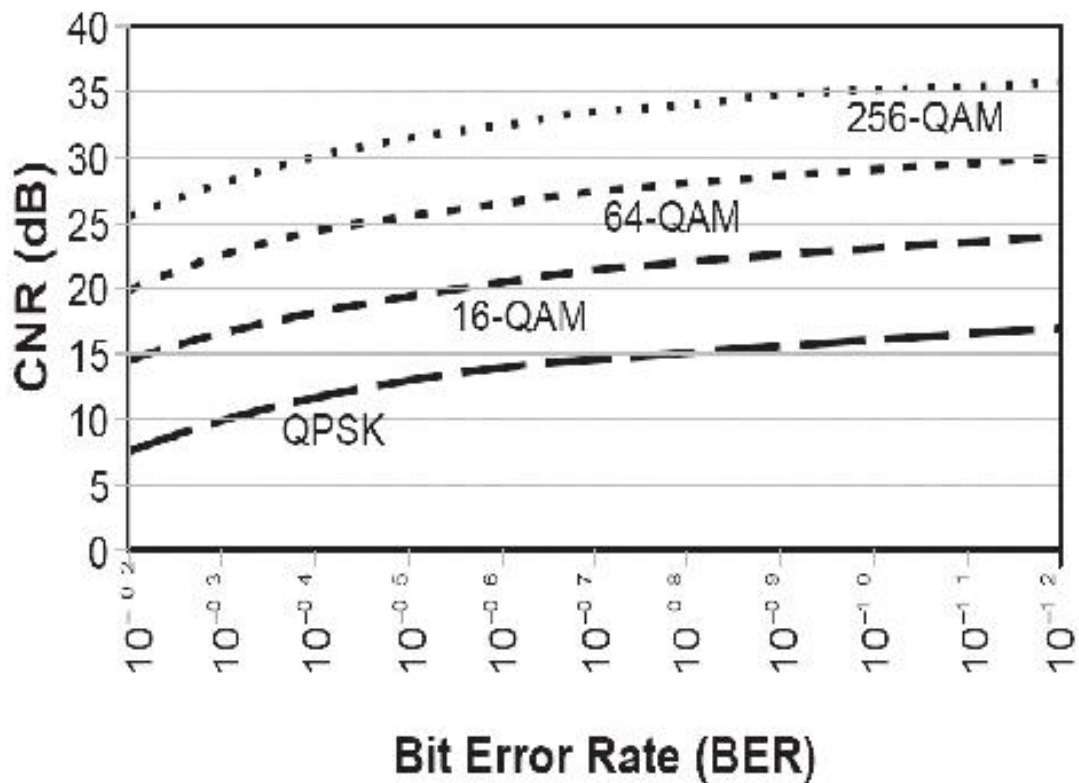


Рисунок 3.7 – Залежності співвідношення сигнал/шум від імовірності бітової помилки для різних порядків QAM

Наведені вище варіанти змін у структурі діаграми-сузір'я свідчать про можливість виникнення бітових помилок при зростанні впливу дестабілізуючих факторів. Очевидна різна залежність імовірності помилок (BER) від параметра CNR (Carrier Noise Ratio - відношення сигнал/шум) для модуляцій з різним показником позиційності.

Перевага високих значень позиційності – це підвищена швидкість передачі даних. Але при цьому більше число рівнів амплітуди сигналу розташовуються близько один від одного, збільшуючи таким чином імовірність нерозрізнення двох рівнів і, як наслідок, - підвищуючи чутливість системи до шуму. Це означає, що вища позиційність QAM більш вимоглива до значення параметра CNR. Відповідні графічні залежності наведені на рисунку 3.7.

Характеристики модуляції QAM-1024 [11]:

- кількість біт на символ -10;
- швидкість передачі символів удесятеро менша інформаційної швидкості;
- збільшення ємності у порівнянні з QAM-64 – біля 60%.

Характеристики модуляції QAM-2048 [8, 9]:

- кількість біт на символ -11;
- швидкість передачі символів 1/11 від інформаційної швидкості;
- збільшення ємності у порівнянні з QAM-64 – біля 83%;
- в одному квадранті всього точок – 512.

Характеристики модуляції QAM-4096:

- кількість біт на символ -12;
- швидкість передачі символів 1/12 від інформаційної швидкості;
- збільшення ємності у порівнянні з QAM-64 – біля 100%;
- в одному квадранті всього точок – 1024.

### 3.2 Адаптивна модуляція і кодування

Найважливішою проблемою при створенні високоефективних систем передачі є проблема узгодження модемів і кодеків з урахуванням статистичних властивостей безперервного каналу. Кодування та модуляцію необхідно розглядати як єдиний процес формування найкращого сигналу, а демодуляцію та декодування - як процес найкращої обробки сигналів. У техніці цифрового зв'язку методи модуляції грають дуже важливу роль. Крім основної функції — перетворення символ - сигнал, тобто виконання функції інтерфейсу між дискретним і безперервним каналами - процес модуляції є складовою загального процесу узгодження сигналу з характеристиками каналу.

Адаптивна модуляція і кодування в системах передачі з нестационарним каналом і зворотним зв'язком забезпечують хороші експлуатаційні показники роботи. Сутність алгоритму, завдяки якому досягається ефект, у тому, що приймач виконує приблизну оцінку каналу і надсилає зворотним каналом результати цієї оцінки назад передавачу. В результаті схема передачі може бути адаптована до характеристик каналу.

Якщо використовуються методи модуляції і кодування без адаптації до умов замирань у каналі, то експлуатаційні показники можуть бути досягнуті за умови постійного енергетичного запасу. Це означає, що такі системи повинні розроблятися для найгіршого стану каналу (найгірших умов передачі сигналу у ньому). Релеєвські замирання можуть викликати втрату потужності сигналу до 30 дБ.

Зниження швидкості передачі або збільшення потужності при погіршенні стану каналу, а також адаптація до замирань каналу за рахунок встановлення сприятливих параметрів каналу при передачі на більш високих швидкостях або з меншою потужністю дозволяють збільшити середню пропускну здатність каналу, зменшити необхідну потужність передачі або зменшити середню ймовірність помилок. Таким чином, ефективність модуляційних схем високої позиційності базується на побудові систем передачі

інформації зі зворотним зв'язком та створенні адаптивних сигнально-кодових конструкцій.

### 3.3 Принцип формування сигнально-кодових конструкцій

В умовах, коли організація оптоволоконних транзитних каналів економічно недоцільна, радіоканали прямого зв'язку НВЧ-діапазону, що є інтегральною частиною мережі мобільного стільникового зв'язку, використовуються для реалізації транзитного каналу передачі між базовими станціями (BTS/NodeB) та контролерами радіомережі (BSC/RNC) більш ніж у 50% випадків по всьому світу. Бурхливий розвиток сервісів передачі в мобільних мережах через популярність смартфонів призвів до зростання потреби щодо передачі широкосмугового трафіку і посилення вимог до пропускної спроможності обладнання транзитних радіоканалів.

Збільшення пропускної здатності пов'язують з такими кроками [6]:

- перехід від модуляції QAM-256 до модуляційної схеми з більшою позиційністю - QAM-4096. При цьому збільшиться інформаційна ємність у каналах при збереженні їх ширини смуги.
- підтримка замість ширини смуги 56 МГц у традиційному діапазоні частот 6–42 ГГц каналів із шириною смуги 112 МГц. Якщо відношення сигнал/шум зберігає своє незмінне значення, то кожне подвоєння ширини смуги каналу забезпечує пропорційне збільшення пропускної здатності.

Для підтримки форматів QAM високої позиційності та більшої ширини смуги НВЧ-канал зв'язку повинен мати більший динамічний діапазон – використовується більше значень амплітуди символів. Ще один аспект проектування полягає в тому, що обладнання має бути конфігурованим і підтримувати всі можливі робочі сценарії, але, водночас час, воно повинне забезпечувати високі характеристики та низьку вартість без надмірного посилення вимог до схеми АРУ та фільтрації у приймачі.

Телекомунікаційна система у межах виділених ресурсів каналу зв'язку повинна забезпечувати високу швидкість та необхідну достовірність передачі інформації. Для цього поєднують використання багатопозиційних видів модуляції та завадостійкого кодування [6]. Комбінацію цих заходів із визначеними параметрами завадостійкості називають сигнально-ковою конструкцією (СКК) [7]. Реалізація такої концепції включно з алгоритмами роботи доцільна в терагерцовому діапазоні на основі технології Wi-Fi.

Як уже зазначалось, сучасні ТКС використовують різні за алгоритмом застосування сигнально-кодові конструкції. Одні з них передбачають стале використання незалежно від стану каналу передачі, інші – мають можливість динамічного вибору на основі певних критеріїв.

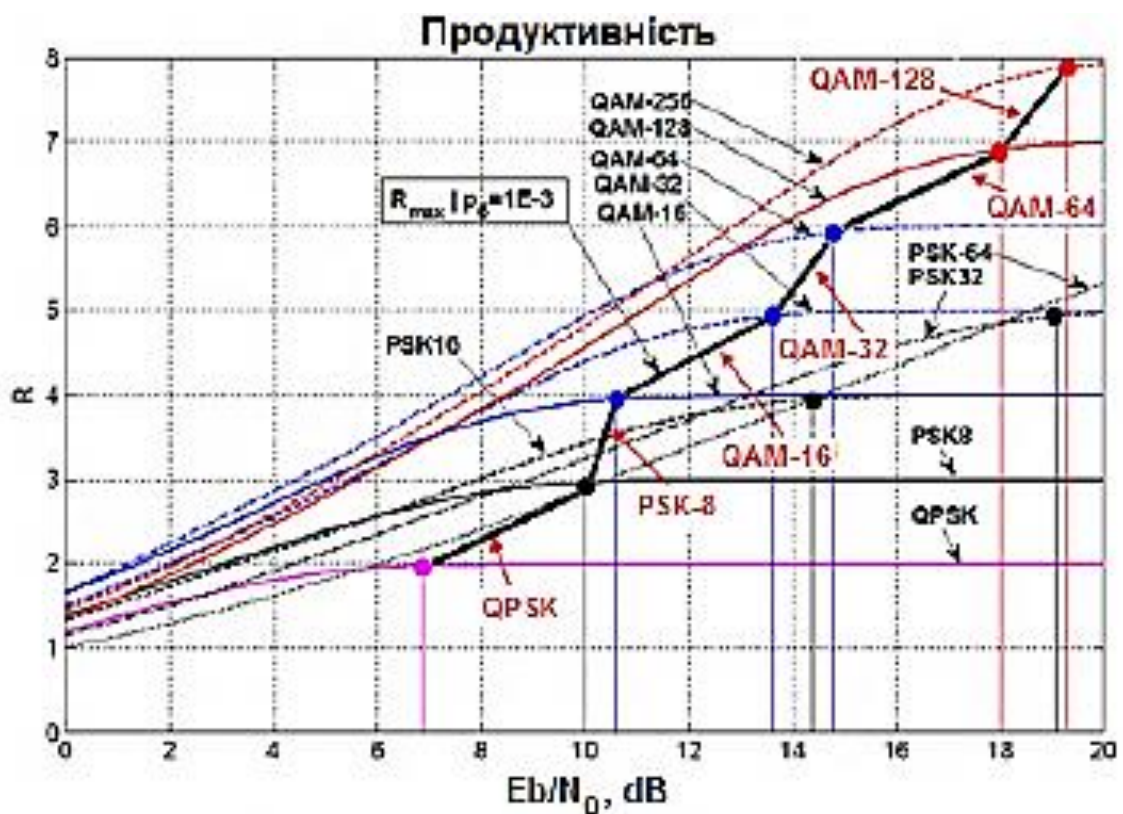


Рисунок 3.8 – Залежність продуктивності каналу зв'язку від відношення рівня енергії сигналу до спектральної потужності шуму для різних видів багатопозиційної модуляції

Інформаційною характеристикою каналу є його продуктивність - характеризує питому кількість інформації, яку можна передати каналом за інтервал часу при заданих спектрально-енергетичних характеристиках. На цей показник безпосередньо впливає вид модуляції. Вибір модуляції може бути використаний в адаптивній інфокомунікаційній системі. Продуктивність каналу для різних видів модуляції наведена на рисунку 3.8.

Сигнально-кодові конструкції (поєднання багатопозиційної маніпуляції з ефективним завадостійким кодуванням) дозволяють підтримувати високу швидкість передачі і забезпечення необхідної завадостійкості) [7]. Завадостійке кодування на основі кодів з низькою щільністю перевірок на парність (LDPC), є одним з найбільш ефективних і перспективних видів завадостійкого кодування завдяки високій швидкості кодування та декодування. Місце LDPC кодів в ієрархії засобів потенційного існування кодів наведено на рисунку 3.9.

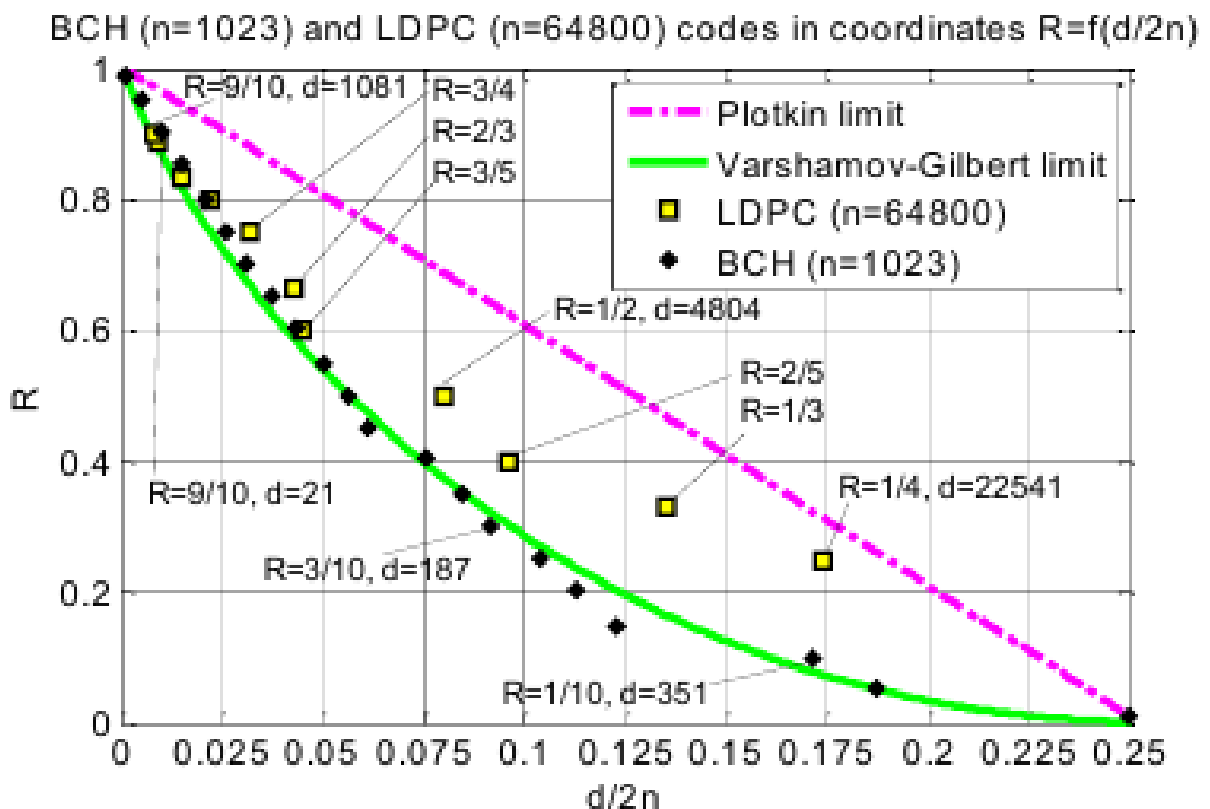


Рисунок 3.9 – Положення LDPC кодів і кодів БЧХ в межах потенційного існування завадостійких кодів:  $r_k = f(d/2n)$

Оцінку ефективності вибору СКК доцільно проводити за енергетичною  $\beta$ , частотною  $\gamma$  та інформаційною  $\eta$  ефективністю, рисунок 3.10. Дослідження показують, що використання СКК має значний вигаш у порівнянні із використанням модуляції низького рівня без завадостійкого кодування. Для ефективнішого розподілу доступу до ресурсів каналу, а також для роботи в умовах багатопроменевого поширення доцільно використовувати технологію OFDM.

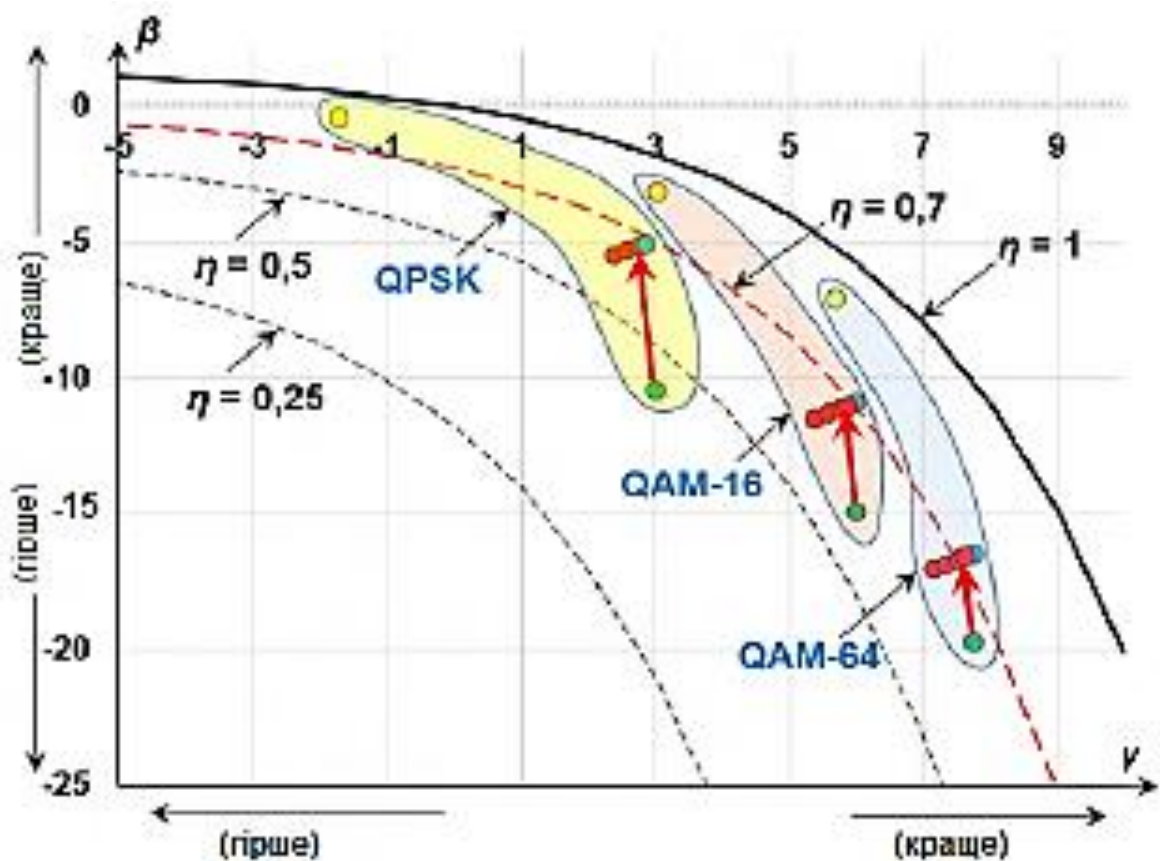


Рисунок 3.10 – Шкала ефективності використання ресурсів каналу зв'язку

Відомо [5] про реалізацію концепції сигнально-кової конструкції у ТКС терагерцового діапазону на основі технології Wi-Fi. Для цього був створений гігабітний модем для з'єднання територіально рознесених сегментів мережі. До складу модема входять каналні маршрутизатори та груповий маршрутизатор. Вхідний потік автоматично розподіляється на всі канали, після чого виконується його обробка.

### 3.4 Висновки до розділу

Наведено динаміку змін діаграм-сузір'я QAM при дії на модульований сигнал дестабілізуючих факторів. Видно, що при збільшенні рівня шуму збільшується площа зони визначення у межах кожної точки сузір'я. Якщо вона стає занадто великою, то приймач не може визначити, яке положення в сузір'яї мало бути передано і це призводить до помилок.

Установлено, що чим вище порядок модуляції для сигналу QAM, тим більша величина зміни амплітуди в сигналі. Це означає, що для радіочастотних підсилювачів передавача потрібні лінійні підсилювачі. Такі підсилювачі мають нижчий ккд, що є недоліком. Це дуже важливо для ефективності використання батареї мобільного обладнання та ефективності живлення базової станції.

Показано, що адаптивна модуляція і кодування в системах передачі з нестационарним каналом і зворотним зв'язком забезпечують хороші експлуатаційні показники роботи. Сутність алгоритму, завдяки якому досягається ефект, - приймач виконує приблизну оцінку каналу і надсилає зворотним каналом результати цієї оцінки назад передавачу. В результаті схема передачі може бути адаптована до характеристик каналу.

Таким чином, ефективність модуляційних схем високої позиційності базується на побудові систем передачі інформації зі зворотним зв'язком та створенні адаптивних сигнально-кодових конструкцій.

Розглянуто принципи формування сигнально-кодових конструкцій (СКК) для сучасних інфокомунікаційних систем. Запропоновано способи і нові технічні рішення для вибору виду сигнальної конструкції з метою досягнення найкращої пропускної здатності та продуктивності в каналі зв'язку безпроводових систем передачі, де показником є відношення рівня сигналу до рівня шуму на вході приймача.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Під час дослідження модуляторів/демодуляторів QAM-N: удосконалення структури та алгоритму роботи для високих рівнів позиційності на працівника могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

### 1. Фізичні:

- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищена чи понижена вологість повітря;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- підвищена чи понижена іонізація повітря;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищена яскравість світла; понижена контрастність;
- пряма і відбита блискіть.

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження та розумове перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо розробку заходів щодо безпечного виконання поставленого завдання.

### 4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Вимоги щодо організації та обладнання робочих місць під час дослідження модуляторів/демодуляторів QAM-N: удосконалення структури та алгоритму роботи для високих рівнів позиційності: площа, відведена на одне робоче місце має становити не менше 6 кв. м., а об'єм – не менше 20 куб. м. Конструкція робочого місця повинна забезпечувати підтримання оптимальної робочої пози (тобто такої, яка дозволяє працівникові виконувати роботу з мінімальним напруженням тіла, і яка дозволяє уникнути перевтоми в ході і після закінчення робочого процесу). Раціональна робоча поза має важливе

значення для збереження здоров'я працівника, оскільки тривале перебування його в незручній і напруженій позі може призвести до таких захворювань, як сколіоз (викривлення хребта), варикозне розширення вен, плоскостопість тощо. Установлено, що робота в зігнутому положенні збільшує затрати енергії на 20%, а при значному нахиленні — на 45% порівняно з прямим положенням корпусу [13].

За потреби особливої концентрації уваги під час виконання робіт суміжні робочі місця операторів необхідно відділяти одне від одного перегородками висотою 1,5 - 2 м.

Робочі місця слід розташовувати відносно джерела природного світла (вікон) таким чином, щоб світло падало збоку, переважно зліва. Також робоче місце має відповідати сучасним вимогам ергономіки:

- стіл повинен мати висоту поверхні 680 - 800 мм., ширину 600 - 1400 мм. і глибину 800 - 1000 мм. (такі параметри забезпечують можливість виконання операцій в зоні досяжності працівника);
- робочий стілець робочий стілець має бути підйомно-поворотним, з можливістю регулювання висоти, бажано зі стаціонарними або змінними підлокітниками і напівм'якою нековзкою поверхнею сидіння, що легко очищається і не електризується;
- екран комп'ютера має розташовуватися на оптимальній відстані від користувача, що становить 600 – 700 мм., але не менше за 600 мм. з урахуванням літерно-цифрових знаків і символів.

Приміщення, де здійснювалося дослідження модуляторів/демодуляторів QAM-N: удосконалення структури та алгоритму роботи для високих рівнів позиційності за небезпекою ураження електричним струмом належить до приміщень без підвищеної небезпеки (сухе, мало заповилене, з нормальною температурою повітря, ізольованими підлогами і малим числом заземлених приладів).

Персональні комп'ютери, периферійні пристрої, інше устаткування (апарати управління, контрольно-вимірювальні прилади, світильники),

електропроводи та кабелі за виконанням і ступенем захисту мають апаратуру захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів. Під час монтажу та експлуатації ліній електромережі необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, застосовувати негорючу ізоляцію.

Лінія електромережі для живлення персональних комп'ютерів і периферійних пристроїв виконується як окрема групова трипровідна мережа шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів.

Усі провідники відповідають номінальним параметрам мережі та навантаження, умовам навколишнього середовища, умовам розподілу провідників, температурному режиму та типам апаратури захисту.

Заземлені конструкції, що знаходяться в приміщеннях, де розміщені робочі місця операторів (батареї опалення, водопровідні труби, кабелі із заземленим відкритим екраном), надійно захищені діелектричними щитками або сітками з метою недопущення потрапляння людини під напругу.

Персональні комп'ютери і периферійні пристрої підключаються до електромережі тільки за допомогою справних штепсельних з'єднань і електророзеток заводського виготовлення. У штепсельних з'єднаннях та електророзетках, крім контактів фазового та нульового робочого провідників, мають бути спеціальні контакти для підключення нульового захисного провідника. Їхня конструкція має бути такою, щоб приєднання нульового захисного провідника відбувалося раніше, ніж приєднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднання при відключенні має бути зворотним.

## 4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

### 4.2.1 Мікроклімат

Стан повітря робочої зони у виробничому приміщенні називають мікрокліматом або метеорологічними умовами. Мікроклімат або метеорологічні умови виробничих приміщенні, визначаються за такими параметрами:

- температурою повітря у приміщенні, С;
- відносною вологістю повітря, %;
- рухливістю повітря, м/с;
- тепловим випромінюванням, Вт/м<sup>3</sup>.

Всі ці параметри поодиночі, а також у комплексі впливають на фізіологічну функцію організму його терморегуляцію і визначають самопочуття.

Дослідження модуляторів/демодуляторів QAM-N: удосконалення структури та алгоритму роботи для високих рівнів позиційності за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [14]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії згідно ДСН 3.3.6.042-99 [15] наведені в табл.4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

| Період року | Допустимі |      |         |
|-------------|-----------|------|---------|
|             | t, °C     | W, % | V, м/с  |
| Теплий      | 22-28     | 55   | 0,1-0,2 |
| Холодний    | 21-25     | 75   | 0,1     |

Для створення і автоматичної підтримки в приміщенні незалежно від зовнішніх умов допустимих значень температури, вологості, чистоти і швидкості руху повітря обладнані системами опалення та кондиціонування повітря. Систематично проводиться вологе прибирання.

#### 4.2.2 Склад повітря робочої зони

Оточуюче нас повітря (атмосфера) є найважливішим фактором забезпечення життя. В природних умовах повітря, як правило, не забруднене отруйними речовинами і життю людини не загрожує. Органи чутливості людини не дозволяють з достатньою точністю визначати якість повітря і запобігати загрозі отруєння.

В приміщенні, де здійснюється дослідження модуляторів/демодуляторів QAM-N: удосконалення структури та алгоритму роботи для високих рівнів позиційності, у повітрі можуть перевищувати ГДК такі речовини як вуглекислий газ, пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні через відкриті вікна та заноситься на одязі і взутті працівниками.

ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

| Назва речовини  | ГДК, мг/м <sup>3</sup> | Середньо добова | Клас небезпечності |
|-----------------|------------------------|-----------------|--------------------|
|                 | Максимально разова     |                 |                    |
| Вуглекислий газ | 3                      | 1               | 4                  |
| Пил нетоксичний | 0,5                    | 0,15            | 4                  |
| Озон            | 0,16                   | 0,03            | 4                  |

Рівні позитивних і негативних іонів у повітрі мають відповідати санітарно-гігієнічним нормам (табл..4.3).

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

| Рівні                 | Кількість іонів в 1 см <sup>3</sup> |                |
|-----------------------|-------------------------------------|----------------|
|                       | n <sup>+</sup>                      | n <sup>-</sup> |
| Мінімально необхідні  | 400                                 | 600            |
| Оптимальні            | 1500-3000                           | 3000-5000      |
| Максимально необхідні | 50000                               | 50000          |

Для підтримки допустимих значень мікроклімату та концентрації позитивних та негативних іонів необхідно передбачати установки або прилади зволоження або штучної іонізації, кондиціонування повітря.

#### 4.2.3 Виробниче освітлення

Освітлення відіграє важливу роль у житті людини. Біля 90% інформації сприймається через зоровий канал, тому правильно виконане раціональне освітлення має важливе значення для виконання всіх видів робіт. Недостатня освітленість або її надмірна кількість знижують рівень збудженості центральної нервової системи і, природно, активність усіх життєвих процесів. Раціональне освітлення є важливим фактором загальної культури виробництва. Неможливо забезпечити чистоту та порядок у приміщенні, в якому напівтемрява, світильники брудні або в занедбаному стані.

Приміщення, в яких встановлені персональні комп'ютери, повинні мати природне та штучне освітлення відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [15]. Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 4.4:

Таблиця 4.4 - Норми освітленості в приміщенні

| Характеристика зорової роботи | Найменший розмір об'єкта розрізнення | Розряд зорової роботи | Підрозряд зорової роботи | Контраст об'єкта розрізнення з фоном | Характеристика фона | Освітленість, лк  |          | КПО, $e_n$ , %             |        |                            |        |
|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------|----------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|
|                               |                                      |                       |                          |                                      |                     | Штучне освітлення |          | Природне освітлення        |        | Сумісне освітлення         |        |
|                               |                                      |                       |                          |                                      |                     | Комбіноване       | Загальне | Верхнє або верхнє і бокове | Бокове | Верхнє або верхнє і бокове | Бокове |
| Дуже високої точності         | Від 0,15 до 0,3                      | II                    | г                        | великий                              | світлий             | 1000              | 300      | 7                          | 2,5    | 4,2                        | 1,5    |

Штучне освітлення в досліджуваному приміщенні здійснюється системою загального рівномірного освітлення. У разі переважної роботи з документами, допускається застосування системи комбінованого освітлення (крім системи загального освітлення додатково встановлюються світильники місцевого освітлення).

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Максимальне використання бічного природного освітлення.
- 2) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.
- 3) Штучне освітлення в приміщенні забезпечується світильниками типу РСП08×250 (однолампові) з лампами ДРЛ-250.

#### 4.2.4 Виробничий шум

Виробничий шум – це сукупність різних за гучністю і тоном звуків, які виникають у повітряному середовищі. В досліджуваному приміщенні наявний

як постійний, так і непостійний шуми. Нормування непостійного шуму, а також орієнтовна оцінка загального рівня постійного шуму здійснюється скоректованим за частотою загальним рівнем звукового тиску – так званим рівнем звуку, який вимірюється в дБА за шкалою «А» шумоміра.

Непостійний шум характеризується еквівалентним рівнем звуку  $L_{A\text{ екв.}}$ , що являє собою середньоквадратичний рівень звуку непостійного шуму, який має такий самий вплив на людину, як і постійний шум.

Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску не повинні перевищувати 50 дБА (табл.4.5).

Таблиця 4.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму (згідно ДСН 3.3.6.037-99 [16])

| Характер робіт       | Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц) |    |     |     |     |      |      |      |      | Допуст-мий рівень звуку, дБА |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------------------------------|
|                      | 32                                                                                                             | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |                              |
| Виробничі приміщення | 86                                                                                                             | 71 | 61  | 54  | 49  | 45   | 42   | 40   | 38   | 50                           |

Рівень шуму в приміщенні не перевищує допустимих значень.

#### 4.2.5 Виробничі випромінювання

Розрізняють природні та штучні джерела електромагнітних полів (ЕМП). У процесі еволюції біосфера постійно перебуває під впливом ЕМП природного походження (природний фон): електричне та магнітне поля Землі, космічні ЕМП, передусім ті, що генеруються Сонцем. У період науково-технічного прогресу людство створило і все ширше використовує штучні джерела ЕМП. У теперішній час ЕМП антропогенного походження значно перевищують природний фон і є тим несприятливим чинником, чий вплив на людину з року в рік зростає.

Значення напруженості електростатичного поля на робочих місцях (як у зоні екрана дисплея, так і на поверхнях обладнання, клавіатури, друкувального пристрою) мають не перевищувати гранично допустимих за ГОСТ 12.1.045-84 [17]. Значення напруженості електромагнітних полів на робочих місцях з ВДТ мають відповідати нормативним значенням (ДСанПіН 3.3.6-2002 [18], ГОСТ 12.1.045-84 [17]). Інтенсивність потоків інфрачервоного випромінювання має не перевищувати допустимих значень відповідно до ГОСТ 12.1.005-88 [19] (табл.4.6).

Таблиця 4.6 – Допустимі параметри електромагнітних неіонізуючих випромінювань і електростатистичного поля

| Види поля                                                                                       | Допустима поверхнева щільність потоку енергії, Вт/кв.м |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-С (220 — 280 нм) | 0,001                                                  |
| Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-В (280 — 320 нм) | 0,01                                                   |
| Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-А (320 — 400 нм) | 10,0                                                   |
| Електромагнітне поле оптичного діапазону в видимій частині спектру 400 — 760 нм                 | 10,0                                                   |
| Електромагнітне поле оптичного діапазону в інфрачервоній частині спектру 0,76 — 10,0 мкм        | 35,0 — 70,0                                            |
| Напруженість електричного поля відеодисплейного терміналу                                       | 20кВ/м                                                 |

Для дотримання наведених нормативів слід використовувати офісну техніку з сертифікатом якості та дотримуватися встановлених режимів праці та відпочинку з ПК.

### 4.3 Пожежна безпека

Пожежна безпека – стан об'єкта, при якому з регламентованою ймовірністю відкидається можливість виникнення та розвиток пожежі, і впливу на людей її небезпечних факторів, а також забезпечується захист матеріальних цінностей.

З урахуванням ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [20] приміщення, де здійснюється дослідження модуляторів/демодуляторів QAM-N: удосконалення структури та алгоритму роботи для високих рівнів позиційності відноситься до категорії вибухопожежонебезпеки В (тверді горючі та важкогорючі речовини і матеріали, за умови, що приміщення, в яких вони знаходяться, не відносяться до категорій А, Б і питома пожежне навантаження для твердих і рідких легкозаймистих та горючих речовин на окремих ділянках площею не менше 10 м<sup>2</sup> кожна перевищує 180 МДж/м<sup>2</sup>).

Клас приміщення і зон з вибухо- і пожежонебезпеки – П-Па (приміщення, у якому знаходяться тверді горючі речовини та матеріали) [21].

#### 4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Усі заходи системи запобігання пожежі в приміщенні можна поділити на організаційні, технічні, режимні та експлуатаційні.

Організаційні заходи пожежної безпеки передбачають: організацію пожежної охорони на об'єкті, проведення навчань з питань пожежної безпеки (включаючи інструктажі та пожежно-технічні мінімуми), застосування наочних засобів протипожежної пропаганди та агітації, проведення перевірок, оглядів стану пожежної безпеки приміщень, будівель, об'єкта в цілому та ін.

До технічних заходів належать: суворе дотримання правил і норм, визначених чинними нормативними документами при реконструкції приміщень, будівель та об'єктів, технічному переоснащенні виробництва,

експлуатації чи можливого переобладнанні електромереж, опалення, вентиляції, освітлення і т. ін.

Заходи режимного характеру передбачають заборону куріння та застосування відкритого вогню в недозволених місцях, недопущення появи сторонніх осіб у вибухонебезпечних приміщеннях чи об'єктах, регламентацію пожежної безпеки при проведенні вогневих робіт тощо.

Експлуатаційні заходи охоплюють своєчасне проведення профілактичних оглядів, випробувань, ремонтів технологічного та допоміжного устаткування, а також інженерного господарства (електромереж, електроустановок, опалення, вентиляції)

#### 4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Система протипожежного захисту – це сукупність організаційних заходів а також технічних засобів, спрямованих на запобігання впливу на людей небезпечних чинників пожежі та обмеження матеріальних збитків від неї.

До основних засобів пожежогасіння, що використовуються в приміщеннях такого класу відносять вогнегасники, розміщення яких в приміщеннях позначається встановленим поруч вказівним знаком

Згідно категорії пожежовибухонебезпеки будівлі, класу приміщення і за вибухо- і пожежонебезпекою П-Па та Наказу Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників», в приміщенні має бути встановлено 2 порошкових або вуглекислотних вогнегасники із зарядом речовини від 3 до 5 кг. [22]

В цілому приміщення по категорії вибухо- і пожежонебезпечності та ступеню вогнестійкості відповідає нормам, але особливу увагу потрібно звернути на утримання в справному стані засобів протипожежного захисту та своєчасне інформування пожежної охорони про несправність пожежної техніки, впровадження систем протипожежного захисту.

#### 4.4 Висновки до розділу

В результаті виконання цього розділу було опрацьовано такі питання охорони праці, як технічні рішення стосовно: гігієни праці та виробничої санітарії, мікроклімат приміщень, виробниче освітлення, виробничий шум та випромінювання. Також розглянуто пожежна безпека у виробничих приміщеннях та технічні рішення системи запобігання пожежі та систем протипожежного захисту.

## ВИСНОВКИ

Розглянуто математичні залежності для I/Q методу формування символів квадратурної амплітудної модуляції QAM-N. Форма кодової комбінації визначає значення амплітуд синфазної та квадратурної компонент, які формують вектор певної довжини (амплітуду символу) та фазу несущої у ньому. Показано, що знаки «плюс/мінус» амплітуд синфазної  $I_k$  та квадратурної  $Q_k$  компонент реалізуються зміною фази синусоїдальної та косинусоїдальної несущих на  $180^\circ$  у помножувачах модулятора. Множина значень амплітуд синфазної та квадратурної компонент мають відносний характер.

Показано, що зі збільшенням порядку модуляції зростає швидкість передачі інформації, тобто сигнал може нести більше біт інформації на символ. Збільшення швидкості передачі даних зі збільшенням порядку модуляції відбувається на шкоду завадостійкості. Схеми модуляції вищого порядку значно менш стійкі до шумів і перешкод.

Показано принципи формування КАМ-сигналу з придушенням несущої. Безперечною перевагою власне CAP-модуляції є висока енергетична ефективність сигналу, що формується. Саме цей спосіб модуляції теоретично здатний забезпечити максимальні значення співвідношення сигнал/шум.

Виконано аналіз енергетичної та спектральної ефективності модуляційної схеми QAM-N. Для підвищення спектральної ефективності  $\mu$  необхідно збільшувати кратність модуляції (значення позиційності)  $\log_2(N)$  і одночасно знижувати значення коефіцієнта заокруглення спектра  $\alpha$ , тим самим збільшуючи крутість зрізу спектра модулюючого сигналу. Практичні значення спектральної ефективності достатньо далекі від теоретичних чи ідеальних.

Отримані аналітичні залежності показують, що спектральна і енергетична ефективності тісно пов'язані між собою. При збільшенні спектральної ефективності  $\mu$  та коефіцієнта заокруглення спектра  $\alpha$  енергетична ефективність зменшується. Це означає, що застосування модуляційних схем з високим рівнем позиційності вимагає збільшення енергії сигналу.

Проведений аналіз завадостійкості показав очікуваний результат – при збільшенні рівня позиційності на фоні підвищення спектральної ефективності відбувається зменшення завадостійкості.

Проаналізовано алгоритм роботи цифрової системи зв'язку, яка використовує модуляційну схему QAM-N. Розглянуто роботу функціональних вузлів схеми. Показано, що в даний час системи використовують динамічні адаптивні методи модуляції. Їх робота базується на тому, що система аналізує стан каналу та адаптує до нього схему модуляції, щоб отримати найвищу швидкість передачі даних для заданих умов.

Запропоновано структурні схеми та алгоритми роботи модулятора і демодулятора модуляційної схеми QAM-N. Показано процедуру формування сигнальної діаграми шляхом використання синфазної та квадратурної компонент та зворотні перетворення у демодуляторі при використанні коду Грея. Наведено структурні схеми блоків відновлення несущої частоти, які є функціональними елементами когерентного (квазікогерентного) демодулятора, також обґрунтована необхідність використання багатопорогового вирішувального пристрою для оцінки значення амплітуд квадратурних компонент.

Наведено динаміку змін діаграм-сузір'я QAM при дії на модульований сигнал дестабілізуючих факторів. Видно, що при збільшенні рівня шуму збільшується площа зони визначення у межах кожної точки сузір'я. Якщо вона стає занадто великою, то приймач не може визначити, яке положення в сузір'яї мало бути передано і це призводить до помилок.

Установлено, що чим вище порядок модуляції для сигналу QAM, тим більша величина зміни амплітуди в сигналі. Це означає, що для радіочастотних підсилювачів передавача потрібні лінійні підсилювачі. Такі підсилювачі мають нижчий коефіцієнт корисної дії, що є недоліком. Це дуже важливо для ефективності використання батареї мобільного обладнання та ефективності живлення базової станції.

Показано, що адаптивна модуляція і кодування в системах передачі з нестационарним каналом і зворотним зв'язком забезпечують хороші експлуатаційні показники роботи. Сутність алгоритму, завдяки якому досягається ефект, - приймач виконує приблизну оцінку каналу і надсилає зворотним каналом результати цієї оцінки назад передавачу. В результаті схема передачі може бути адаптована до характеристик каналу.

Розглянуто принципи формування сигнально-кодових конструкцій для сучасних інфокомунікаційних систем. Запропоновано способи і нові технічні рішення для вибору виду сигнальної конструкції з метою досягнення найкращої пропускної здатності та продуктивності в каналі зв'язку безпроводних систем передачі, де показником є відношення рівня сигналу до рівня шуму на вході приймача.

У роботі також наведено основні заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кравчук С.О., Наритник Т.М. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону. Монографія. – Житомир: ФОП «Євєнюк О.О.», 2015. – 208 с.
2. Ільченко М.Ю. Основи теорії телекомунікацій; навч. посібник; за заг. ред. М. Ю. Ільченка. – К.: ІСЗЗІ НТУУ «КПІ», 2010. – 788 с.
3. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Сучасні телекомунікаційні системи. – К. : Наук. думка, 2008. – 328 с.
4. Тенденції в телекомунікаціях 2015 [Електронний ресурс] = Special issue: ten trends tell where communication technologies are headed // ComSoc. – Режим доступу: <http://www.comsoc.org/ctn/ieee-comsoc-ctn-special-issue-ten-trends-tell-where-communication-technologies-are-headed-2015>.
5. Т.М. Наритник, С.О. Осипчук, Л.О. Уривський Особливості формування сигнально-кодових конструкцій на основі технології Wi-Fi для побудови телекомунікаційних систем терагерцового діапазону // Електронне наукове фахове видання «Проблеми телекомунікацій». №2 (17). 2015.
6. Багатоканальний електрозв'язок та телекомунікаційні технології: Підручник для проф.-тех. навч. закладів/ За редакцією Поповського В. В.– Харків: «Компанія СМІТ», 2003.– 512 с.
7. Климаш М.М. Проектування ефективних систем безпроводного зв'язку [Текст] / М.М. Климаш, В.О. Пелішок. – Львів, 2010. – 232 с
8. Системи доступу: підручник / Г.Г. Бортник, В.М. Кичак, О.В. Стальченко. –Вінниця: ВНТУ, 2010. – 298 с.
9. Кабак В.С. Функціональні пристрої телефонів мобільного зв'язку: навчальний посібник [Текст] / В.С. Кабак, Р.В. Уваров. – Запоріжжя, 2007. – 375 с.
10. Горбатий І.В. Дослідження інформаційної ефективності амплітудної модуляції багатьох складових // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. — 2010. — №681. — С. 191–196.

11. Підвищення швидкості передачі інформації на основі використання алгоритму квадратурної амплітудної модуляції [Текст] / С. Т. Барась, А. А. Овчарук, Т.І. Овчарук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – №2. – С. 242 – 249
12. Горбатий І.В. Математичні моделі та методи дослідження телекомунікаційних каналів: Монографія. — Львів : СПОЛОМ, 2006. — 156 с.
13. ДСТУ ОHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог ОHSAS 18001:2007 (ОHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с.
14. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: [http://sop.zp.ua/norm\\_praop\\_0\\_00-7\\_15-18\\_01\\_ua.php](http://sop.zp.ua/norm_praop_0_00-7_15-18_01_ua.php).
15. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>
16. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
17. ДБН В.2.5-28-20018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>
18. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>
19. ДСНіПЗ.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>.
20. ДСанПіН 3.3.6-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі

з джерелами електромагнітних полів - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z0203-03>.

21. НПАОП 0.00-7.11-12. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12>.

22. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: [https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu\\_b\\_v\\_1\\_1\\_36/5-1-0-1759](https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759).

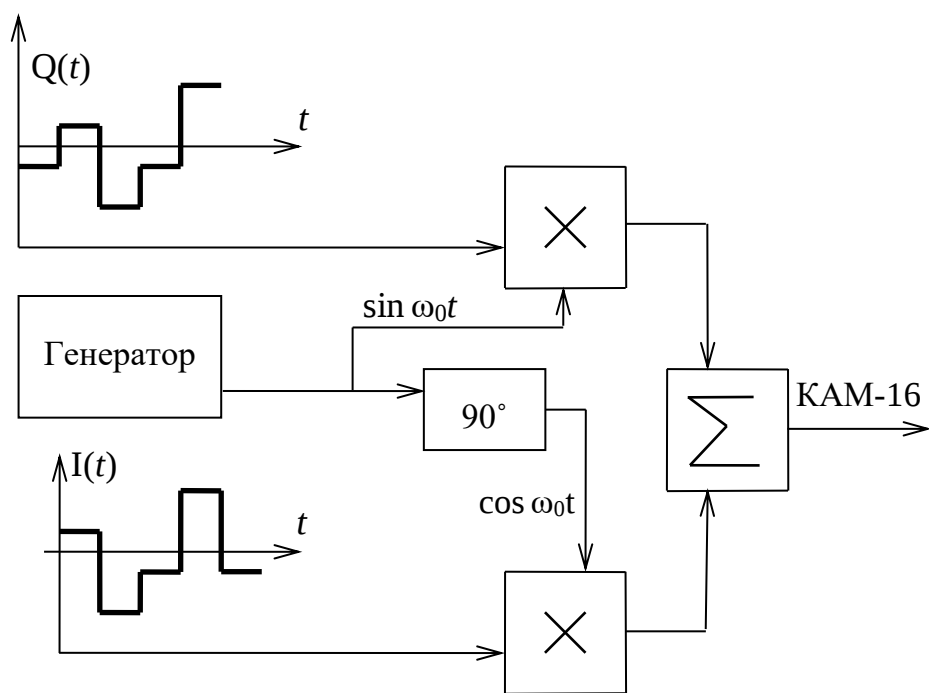
23. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: [http://www.poliplast.ua/doc/dbn\\_v.1.1-7-2002.pdf](http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf).

24. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

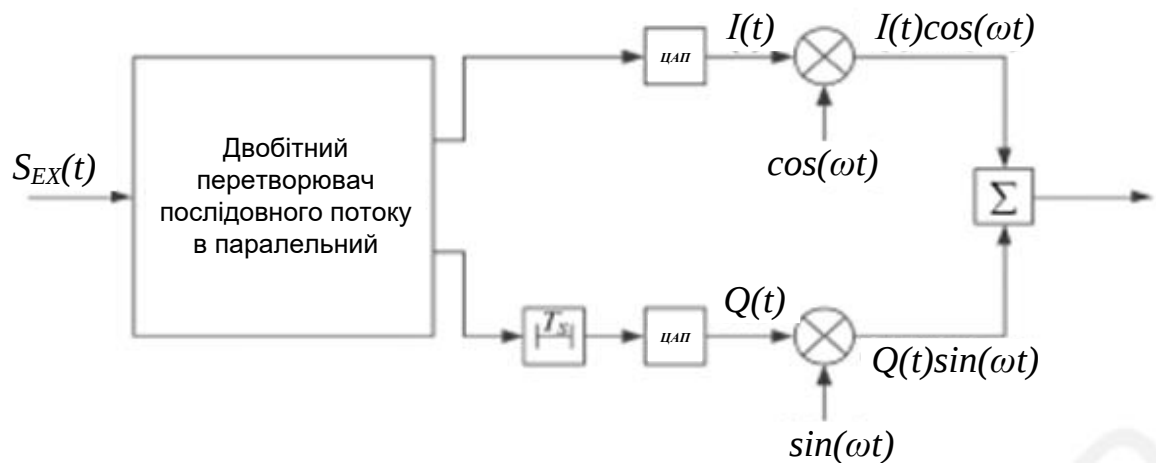
Додаток А  
(обов'язковий)

**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**  
**МОДУЛЯТОРИ/ДЕМОДУЛЯТОРИ QAM-N: УДОСКОНАЛЕННЯ**  
**СТРУКТУРИ ТА АЛГОРИТМУ РОБОТИ ДЛЯ ВИСОКИХ РІВНІВ**  
**ПОЗИЦІЙНОСТІ**

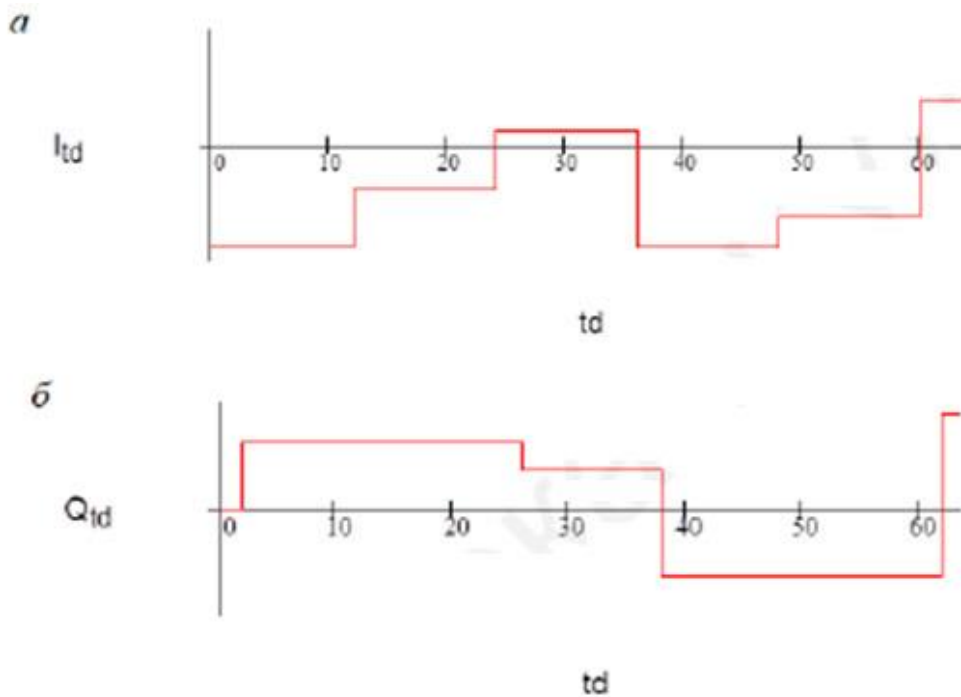
назва бакалаврської дипломної роботи



Спрощена структурна схема модулятора QAM-16



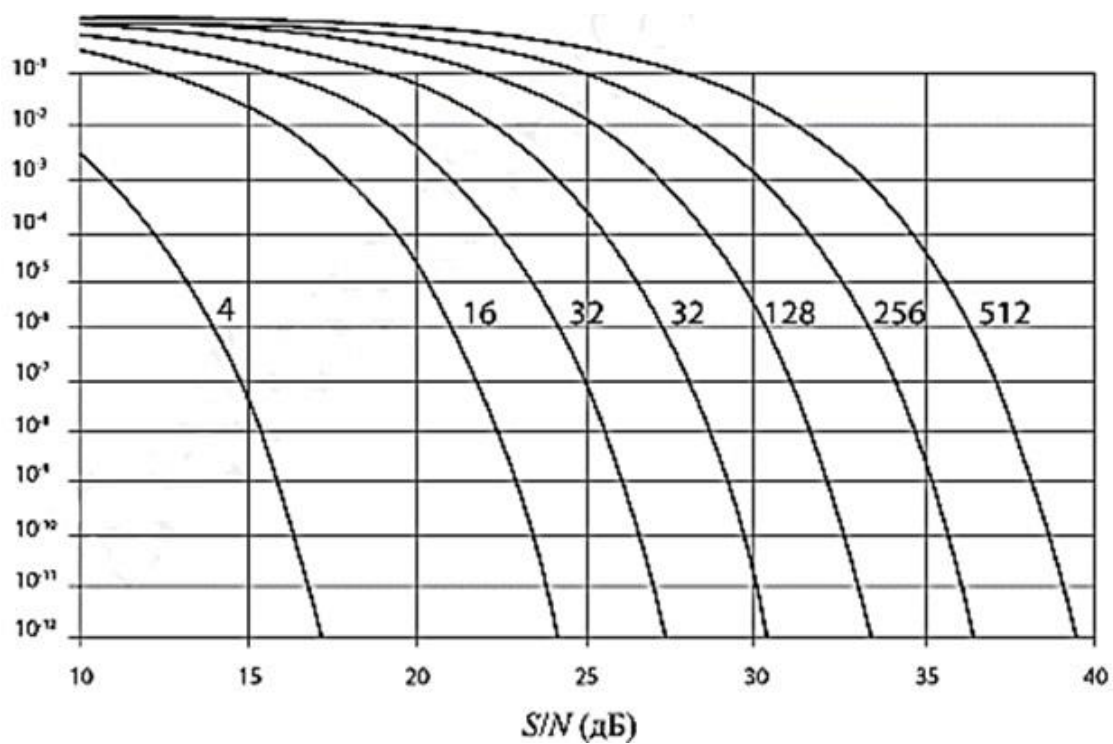
Структурна схема модулятора QAM- N



Формування модуляційних сигналів

*a* – значення вектора  $I(t)$  (синфазна компонента);

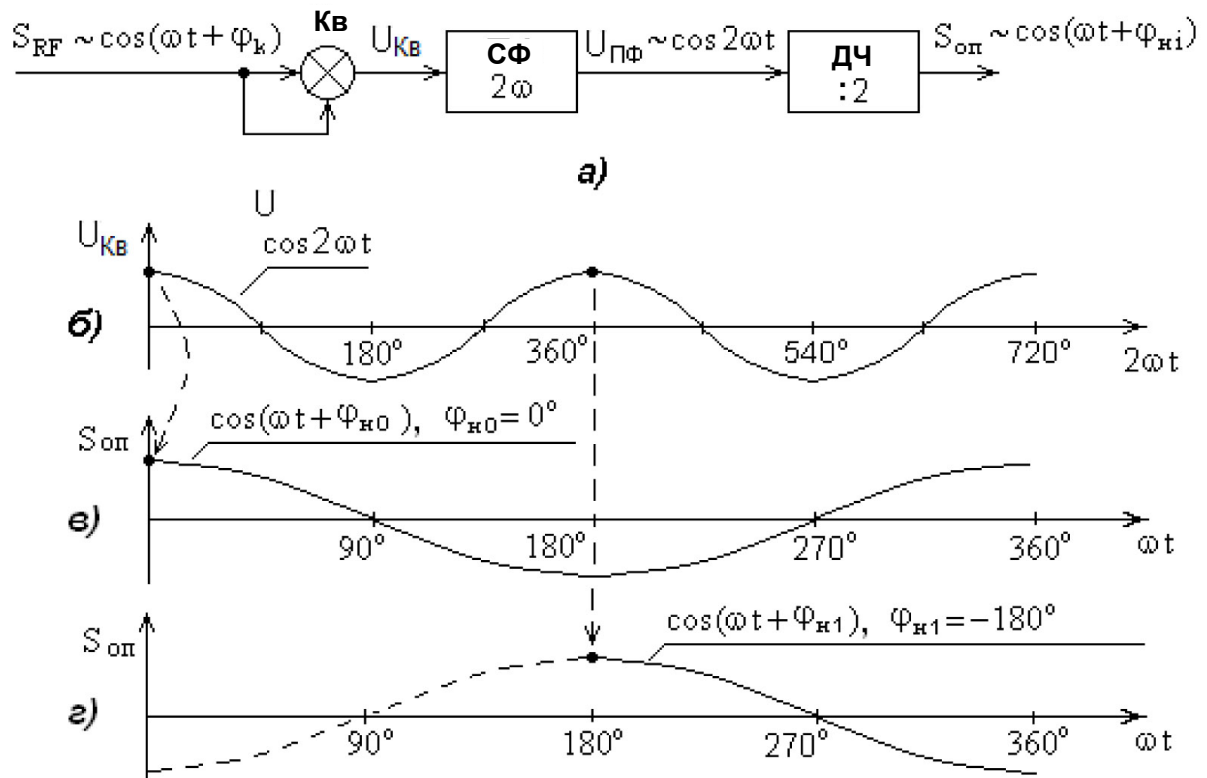
*б*) – значення вектора  $Q(t)$  (квадратурна компонента)



Коефіцієнт бітових помилок залежно від відношення сигнал/шум  
для різних значень позиційності як параметра



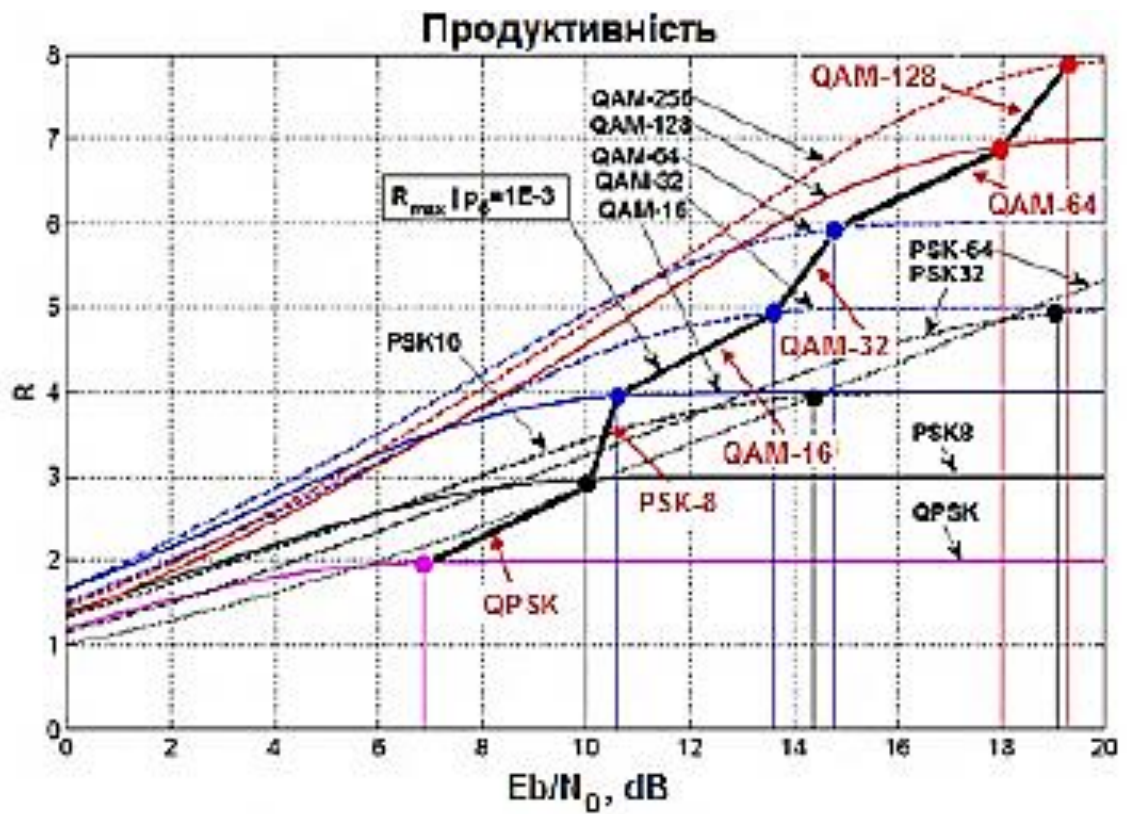
Структурна схема когерентного демодулятора КАМ-сигналів



Структурна схема БВНЧ (а);

вихідна напруга квадратора (б);

опорна напруга на виході ДЧ: при  $\varphi_{н0} = 0^\circ$  (в) та при  $\varphi_{н1} = -180^\circ$  (г)



Залежність продуктивності каналу зв'язку від відношення  
рівня енергії сигналу до спектральної потужності шуму  
для різних видів багатопозиційної модуляції

## Додаток Б

Протокол  
перевірки кваліфікаційної роботи  
на наявність текстових запозичень

# ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Модулятори/демодулятори QAM-N: удосконалення структури та алгоритму роботи для високих рівнів позиційності

Тип роботи: Бакалаврська дипломна робота  
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра Інфокомунікаційних систем і технологій, факультет Інформаційних електронних систем  
(кафедра, факультет)

## Показники звіту подібності Unichesk

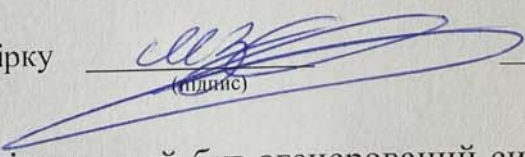
Оригінальність 91,85 % Схожість 8,15 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

☒ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.

☐ 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа відповідальна за перевірку  Васильківський М.В.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

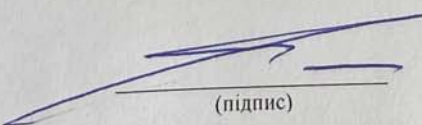
Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи

  
(підпис)

Черната П.С.  
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Барась С. Т.  
(прізвище, ініціали)