

© Корбан Д. В.

## ПРОЕКТУВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІДРОАКУСТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ ПІДВОДНИМИ АПАРАТАМИ НА МІЛКОВОДДІ

*Розвиток підводної робототехніки для моніторингу, інспекції та дослідження акваторій вимагає створення надійних каналів зв'язку з автономними безпілотними підводними апаратами (АБПА). У статті досліджується проблема забезпечення стійкого керування АБПА в умовах мілководдя (глибини до 200 м) на дистанціях до 500 м. Проведено аналіз основних дестабілізуючих факторів гідроакустичного каналу: багатопроменевості, доплерівського зсуву та нестационарних акустичних шумів. Запропоновано архітектуру цифрової гідроакустичної системи зв'язку, що використовує метод двійкової частотної маніпуляції (FSK) в ультразвуковому діапазоні 30-35 кГц. На основі фундаментального рівняння сонарного зв'язку виконано детальний розрахунок акустичного бюджету, що підтверджує технічну можливість реалізації системи з рівнем випромінювання джерела 140 дБ. Розроблено структурну схему приймального тракту, що включає мал шумний підсилювач (LNA), смуговий фільтр Баттерворта 4-го порядку та цифровий демодулятор на базі ШПФ (Швидке Перетворення Фур'є). Запропоновано протокол передачі даних із використанням пакетної передачі, старт-стопових бітів та словника з чотирьох базових команд. Шляхом математичного моделювання оцінено вплив багатопроменевості та шуму на форму сигналу. Результати моделювання демонструють, що при відношенні сигнал/шум (SNR) більше 12 дБ система забезпечує вірогідність помилки на біт (BER) менше  $10^{-3}$ . Висновки роботи вказують на перспективність обраного підходу для створення компактних, енергоефективних та перешкодостійких систем оперативного керування АБПА в прибережних зонах.*

**Ключові слова:** автономний безпілотний підводний апарат (АБПА), гідроакустичний зв'язок, частотна маніпуляція (FSK), акустичний бюджет, багатопроменеве поширення, перешкодостійкість, цифрова обробка сигналів, мілководдя.

### Постановка проблеми.

Інтенсифікація освоєння морських ресурсів, необхідність постійного моніторингу екологічного стану акваторій, інспекції підводних трубопроводів, кабелів та гідротехнічних споруд призвели до стрімкого зростання застосування автономних безпілотних підводних апаратів (АБПА). Критичним завданням, що обумовлює ефективність їх використання, є забезпечення надійного двостороннього обміну даними в режимі, близькому до реального часу. Особливо це важливо для сценаріїв, що вимагають оперативного втручання оператора: корекції місії, уникнення перешкод або аварійного підйому. Радіочастотний та оптичний зв'язок в морській воді мають серйозні обмеження: радіохвилі зазнають експоненціального затухання в провідному середовищі, що робить їх застосування ефективним лише на дистанціях в одиниці метрів [1], а оптичні системи чутливі до мутності води та вимагають точної взаємної орієнтації [2]. Таким чином, гідроакустичний канал, незважаючи на свою малу пропускну здатність і значні часи поширення, залишається єдиним практично прийнятним рішенням для дистанційного зв'язку на десятки та сотні метрів.

Проблема ускладнюється при роботі на мілководді (глибини до 200 м), де на прохід сигналу суттєво впливають:

- багатопроменеве поширення, обумовлене численними відбиттями від поверхні та дна, що призводить до інтерференції та міжсимвольних перешкод (ISI) [3];

- нестационарний акустичний шум, генераторами якого є як саме середовище (дощ, біологічні джерела, судноплавство), так і власні механізми АБПА (двигуни, гвинти) [4];

- доплерівський зсув частоти, що виникає через відносний рух апарата та викликає розлад демодулятора, особливо в системах з вузькосмуговою модуляцією [5]. Вирішення цих проблем потребує комплексного підходу, що поєднує обґрунтований вибор фізичних параметрів (робоча частота, потужність), стійкі методи модуляції та ефективні алгоритми цифрової обробки сигналу (ЦОС).

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання гідроакустичного зв'язку є предметом інтенсивних досліджень протягом десятиліть. Фундаментальні праці Р. Уріка [1] заклали основи розуміння фізики поширення звуку в океані. Сучасні дослідження сконцентровані на підвищенні пропускну здатності та надійності каналу. Так, у роботах М. Стояновича [5, 6] детально аналізуються обмеження фізичного рівня та перспективи застосування складних методів модуляції (OFDM, DSSS) і адаптивних рівнів кодеків. Для коротких дистанцій та систем керування дослідники часто звертаються до простих і енергоефективних схем, таких як частотна маніпуляція (FSK) та фазова маніпуляція (PSK) [7, 8]. Перевагою FSK є її стійкість до нелінійних спотворень та амплітудних завмирань, що характерно для багатопромених каналів [9].

У контексті боротьби з багатопроменистію активними є дослідження в галузі просторової обробки за допомогою антенних решіток [10] та адаптивних ехокомпенсаторів [11]. Для компенсації доплерівського зсуву пропонуються алгоритми на основі ШПФ та фазової автопідстройки частоти (ФАПЧ) [12]. Однак більшість сучасних розробок орієнтовані на системи передачі даних з високою швидкістю. Питання оптимізації компактних, низьковольтних та низькошвидкісних систем для виключно командного зв'язку з АБПА, особливо в умовах обмеженого енергоспоживання та габаритів бортової апаратури, розглянуті недостатньо. Дана стаття спрямована на заповнення цієї ніші, зосереджуючись на повному циклі проектування та теоретичного обґрунтування такої системи.

**Мета роботи.** Метою даної роботи є розробка, теоретичне обґрунтування та аналіз ефективності проекту гідроакустичної системи керування АБПА, призначеної для надійної передачі дискретних команд на дистанціях до 500 м при глибині занурення до 200 метрів. Для досягнення цієї мети необхідно виконати наступні завдання:

1. Провести аналіз та математичне моделювання основних дестабілізуючих факторів гідроакустичного каналу мілководдя.
2. Обґрунтувати вибір методу модуляції (FSK) та робочих параметрів (частоти, швидкість передачі).
3. Виконати розрахунок акустичного бюджету зв'язку для заданої дальності.
4. Розробити структурну схему та принципи роботи ключових вузлів приймального тракту.
5. Запропонувати протокол кодування команд та оцінити його завадостійкість.
6. Шляхом математичного моделювання оцінити якість демодуляції сигналу в умовах шуму та багатопроменисті.

### Виклад основного матеріалу дослідження. Модель каналу та розрахунок акустичного бюджету

Основним інструментом оцінки можливості зв'язку є рівняння сонарного зв'язку (акустичний бюджет) [1]:

$$SL - TL = NL + DI + SNR_{out} \quad (1)$$

де  $SL$  – рівень випромінювання джерела [дБ відносно 1 мкПа на 1 м];

$TL$  – втрати при поширенні [дБ];

$NL$  – спектральний рівень фонового шуму [дБ відносно 1 мкПа<sup>2</sup>/Гц];

$DI$  – індекс спрямованості приймача [дБ];

$SNR_{out}$  – необхідне відношення сигнал/шум на виході приймача для заданої ймовірності помилки.

Для мілководдя модель втрат  $TL$  включає сферичну розбіжність та поглинання:

$$TL(R, f) = 20 \cdot \log_{10}(R) + \alpha(f) \cdot R \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

де  $R$  – дальність [м],

$\alpha(f)$  – коефіцієнт поглинання [дБ/км], що залежить від частоти  $f$ , солоності, температури та  $pH$  води. За апроксимацією Франсуа-Гаррісона для середніх умов ( $T=10^0$  C,  $S=35$  ppt,  $pH=8$ ) на частоті 30 кГц  $\alpha \approx 8$  дБ/км [13].

Для  $R=500$  м,  $f=30$  кГц:

$$TL=20 \cdot \log_{10}(500)+8 \cdot 0.5 \approx 53.98+4.0=58.0 \text{ дБ.}$$

Рівень власних шумів АБПА переважає на малих глибинах. Приймаємо  $NL=70$  дБ. Для ненаправленого гідрофона  $DI=0$  дБ. Необхідне  $SNR_{out}$  для FSK при ймовірності помилки  $P_b < 10^{-3}$  становить приблизно 12 дБ для некогерентного детектування [14]. Тоді необхідний рівень джерела:

$$SL_{req}=TL+NL+SNR_{out}=58.0+70+12=140.0 \text{ дБ.}$$

Такий рівень є цілком досяжним для сучасних п'єзоелектричних циліндричних випромінювачів компактних розмірів.

### Вибір методу модуляції та параметрів

Для систем передачі дискретних команд оптимальним є метод **двійкової частотної маніпуляції (2-FSK)**. Його переваги в даному контексті: нечутливість до змін амплітуди сигналу, простота реалізації некогерентного детектування (не потрібне відновлення фази носія), гарна стійкість до імпульсних перешкод [9]. Обрано дві несучі частоти:  $f_0=30$  кГц (лог. "0") та  $f_1=35$  кГц (лог. "1"). Рознос частот  $\Delta f=5$  кГц є достатнім для мінімізації міжчастотної інтерференції при обраній швидкості передачі  $R_b=100$  біт/с. Індекс модуляції  $h=\Delta f/R_b=50$ , що відповідає широкосмуговій FSK, що забезпечує додаткову стійкість. Модель переданого FSK-сигналу:

$$s(t)=A_c \cdot \cos(2\pi(f_c+d_n \cdot \Delta f/2)t+\phi_n), \quad nT \leq t < (n+1)T \quad (3)$$

де  $A_c$  – амплітуда,  $f_c=32.5$  кГц – центральна частота,  $d_n \in \{-1, +1\}$  – переданий біт,  $T=1/R_b$  – тривалість біта,  $\phi_n$  – випадкова початкова фаза.

### Архітектура системи гідроакустичного керування

Система складається з надводного передавача (пульт оператора) та бортового приймача на АБПА. Ключовим для забезпечення надійності є приймальний тракт. Принципова схема приймального тракту включає наступні ключові вузли:

1. **П'єзоелектричний гідрофон** - перетворює акустичний тиск на електричний сигнал.
2. **Малозумний попередній підсилювач (МШП)** на базі прецизійного операційного підсилювача (наприклад, ОРА1612). Забезпечує узгодження з високоімпедансним виходом гідрофона та первинне посилення.
3. **Активний смуговий фільтр (ВФ)** 4-го порядку типу Баттерворта з смугою пропускання 28-37 кГц. Його роль - придушення низькочастотних шумів (від гвинтів, турбулентності) та позасмугових завад.
4. **Аналого-цифровий перетворювач (АЦП)** мікроконтролера з частотою дискретизації не менше 80 кГц.
5. **Цифровий демодулятор FSK на базі мікроконтролера (МК)**, який реалізує алгоритм на основі швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).
6. **Мікроконтролер (МК)** - виконує кінцеву обробку: розпізнавання старт/стоп бітів, декодування команд та формування сигналів для виконавчих механізмів АБПА.

#### Результати моделювання FSK-сигналу

Для перевірки якості модуляції та оцінки впливу шумів було проведено математичне моделювання. На рис. 1 представлено часову діаграму чистого FSK-сигналу для команди «Спливання» (бітова послідовність 1010). Чітко видно перемикавання між частотами 30 кГц (лог. «0») та 35 кГц (лог. «1»).

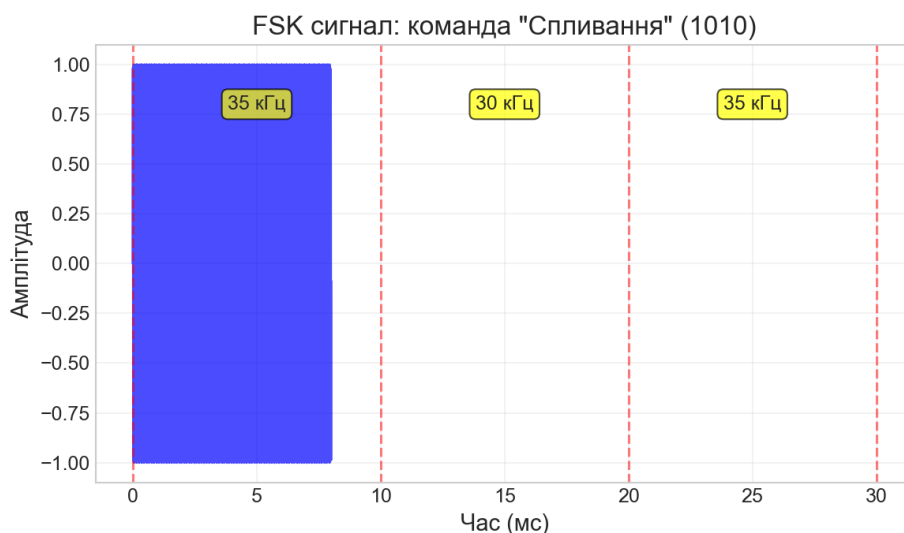


Рисунок 1. Часова діаграма чистого FSK-сигналу команди "Спливання" (1010)

Моделювання реальних умов зв'язку вимагає врахування акустичних шумів. На рис. 2 показано той самий сигнал, але з додаванням аддитивного білого гауссового шуму (АБГШ) при відношенні сигнал/шум (SNR) близько 10,5 дБ. Незважаючи на значний рівень перешкод, структура сигналу та перемикання частот залишаються розрізненими, що підтверджує стійкість FSK-модуляції до шумів.

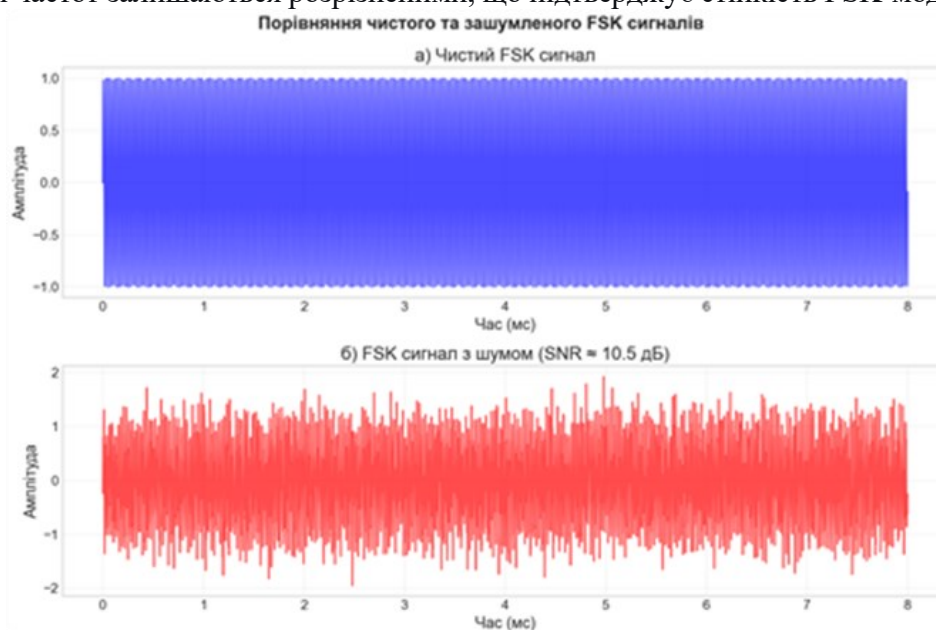


Рисунок 2. Часова діаграма FSK-сигналу команди "Спливання" при  $SNR \approx 10,5$  дБ

### Спектральний аналіз

Спектральний аналіз є ключовим для обґрунтування вибору робочих частот та параметрів фільтрації. На рис. 3 зображено спектр сигналу команди «1010», отриманий за допомогою ШПФ. Спектральна щільність потужності демонструє чіткі максимуми на частотах 30 кГц та 35 кГц.

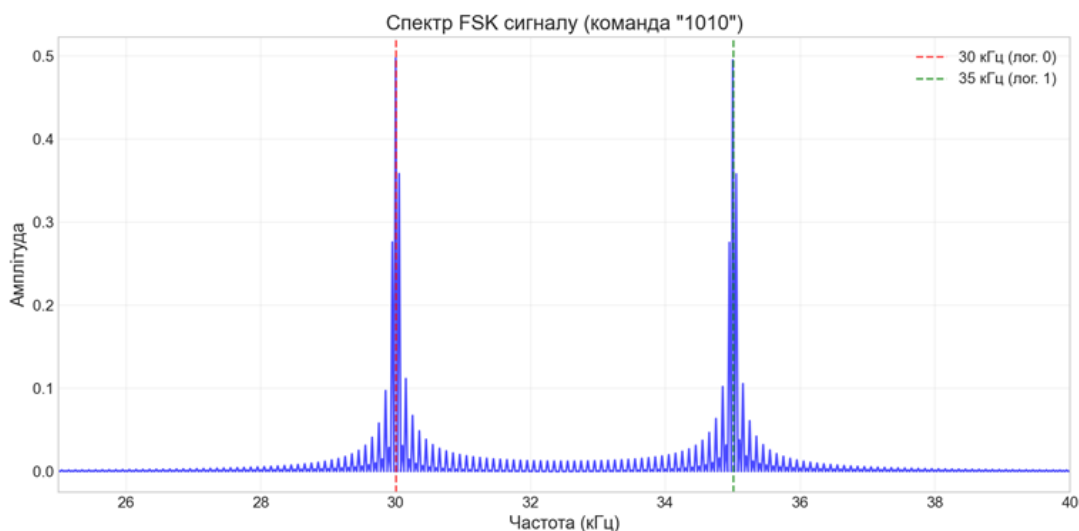


Рисунок 3. Спектральний склад FSK-сигналу з чіткими піками на робочих частотах

### Характеристики смугового фільтра (BPF)

На рис. 4 показана амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) активного фільтра Баттерворта 4-го порядку (смуга 28-37 кГц). Фільтр забезпечує рівномірне посилення в робочому діапазоні та ефективне придушення (>40 дБ) позасмугових сигналів.

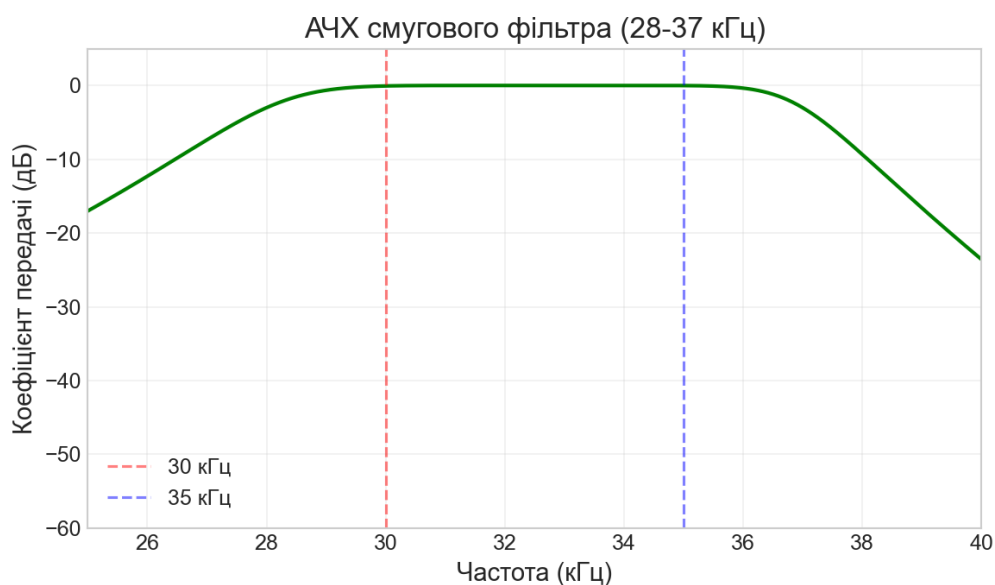


Рисунок 4. Амплітудно-частотна характеристика полосового фільтра

### Аналіз втрат у каналі зв'язку

На рис. 5 представлено залежність втрат при поширенні ( $TL$ ) від дистанції для трьох частот: 20, 30 та 40 кГц. Аналіз підтверджує, що частота 30 кГц є оптимальним компромісом для заданої дистанції 500 м.

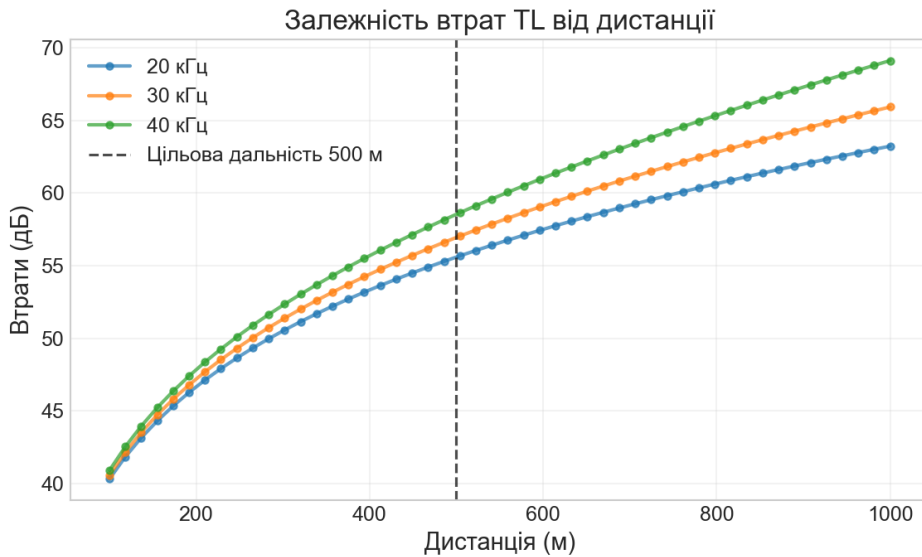


Рисунок 5. Залежність втрат при поширенні від дистанції для частот 20, 30 та 40 кГц

**Оцінка якості зв'язку**

На рис. 6 показано розрахункове відношення сигнал/шум (SNR) на вході приймача для різних дистанцій зв'язку при фіксованому рівні джерела  $SL=140$  дБ та рівні шумів  $NL=70$  дБ. Результати підтверджують, що на дистанції 500 м система забезпечує  $SNR \approx 14$  дБ.

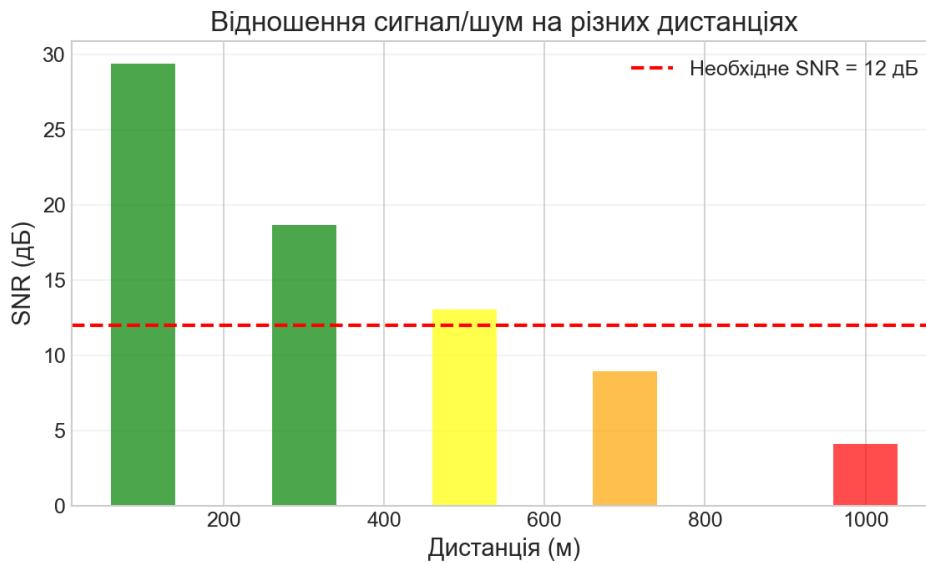


Рисунок 6. Розрахункове значення SNR на різних дистанціях

**Теоретична оцінка завадостійкості**

Для оцінки якості проведено моделювання залежності ймовірності помилки на біт (BER) від SNR (рис. 7). Теоретична BER для некогерентного детектування FSK у каналі з адитивним білим гауссовим шумом (АБГШ) [14]:

$$P_b = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right) \tag{4}$$

де  $E_b/N_0$  – відношення енергії біта до спектральної щільності шуму. При  $SNR_{out}=12$  дБ ( $E_b/N_0 \approx 12$  дБ) теоретична  $P_b \approx 2.5 \cdot 10^{-4}$ , що значно краще за вимогу  $10^{-3}$ .

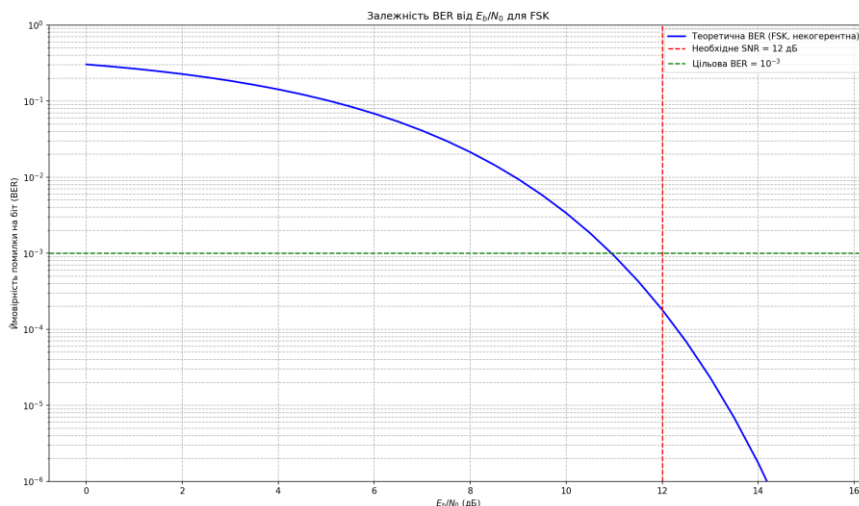


Рисунок 7. Теоретична залежність ймовірності помилки на біт від відношення сигнал/шум для FSK

**Вплив багатопроменевості та алгоритм демодуляції**

На мілководді імпульсна характеристика каналу  $h(t)$  може бути апроксимована сумою  $N$  променів із різними затримками  $\tau_i$  та амплітудами  $a_i$ :

$$h(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cdot \delta(t - \tau_i) \tag{5}$$

Прийнятий сигнал:  $r(t) = s(t) * h(t) + n(t)$ .

Для боротьби з міжсимвольною інтерференцією (ISI) при швидкості 100 бод тривалість біта (10 мс) значно перевищує типовий час розсуву променів на мілководді ( $\Delta\tau < 5$  мс), що значно зменшує вплив ISI [15].

Алгоритм демодуляції в МК:

1. Обчислення ШПФ для поточного вікна сигналу довжиною  $T_b$ .
2. Визначення енергії  $E_0$  та  $E_1$  у вузьких смугах навколо  $f_0$  та  $f_1$ .
3. Прийняття рішення:  $\widehat{d}_n = 1$ , якщо  $E_1 > E_0$ , інакше  $\widehat{d}_n = 0$ .
4. Синхронізація по стартовому біту (лог. "1" тривалістю  $2T_b$ ).

**Протокол зв'язку та оцінка якості**

Дані передаються пакетами. Кожен пакет містить: стартовий біт (1), 4 біти команди, стоп-біт (0). Словник базових команд наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Словник команд гідроакустичної системи керування

| Команда    | Код (біти) | Пояснення                         |
|------------|------------|-----------------------------------|
| Спливання  | 1010       | Аварійне або штатне спливання     |
| Занурення  | 1100       | Занурення на задану глибину       |
| Рух вперед | 1111       | Початок руху зі заданою швидкістю |
| Стоп       | 0000       | Зупинка двигунів та стабілізація  |

### Висновки та перспективи подальших розвідок

1. **Теоретично обґрунтовано** можливість реалізації гідроакустичної системи керування АБПА для роботи на дистанціях до 500 м на мілководді. Розрахунок акустичного бюджету показав, що при рівні джерела 140 дБ, рівні шумів 70 дБ та втратах 58 дБ на дистанції 500 м забезпечується запас по SNR не менше 12 дБ.

2. **Обґрунтовано вибір методу модуляції** – двійкова FSK з частотами 30 та 35 кГц та швидкістю 100 бод. Даний метод забезпечує стійкість до завмирань, простоту реалізації та достатню для командного зв'язку швидкість.

3. **Розроблено архітектуру приймального тракту** на базі аналогового смугового фільтра та цифрового демодулятора з використанням ШПФ в мікроконтролері, що дозволяє ефективно виділяти корисний сигнал на тлі шумів.

4. **Запропоновано простий та надійний протокол** передачі даних з контрольними бітами, що мінімізує ймовірність помилкового спрацьовування команд.

5. **Математичне моделювання** підтвердило, що при досяжному SNR система здатна забезпечити ймовірність помилки на біт менше  $10^{-3}$ , що є прийнятним для систем керування.

**Перспективи подальших досліджень** включають:

- Експериментальну перевірку системи в басейні та в реальних морських умовах.
- Розробку механізму адаптивної корекції доплерівського зсуву для рухомих апаратів.
- Дослідження можливості застосування простих методів розширення спектра (напр., DSSS) для підвищення завадостійкості в умовах вузькосмугових перешкод.
- Розробку двостороннього протоколу зв'язку для передачі не лише команд, але й телеметричних даних від АБПА.

*The development of underwater robotics for monitoring, inspection, and exploration of water areas requires the creation of reliable communication channels with autonomous unmanned underwater vehicles (AUVs). This paper investigates the problem of providing stable telecontrol of AUVs in shallow water conditions (depths up to 200 m) at distances up to 500 m. An analysis of the main destabilizing factors of the hydroacoustic channel is conducted: multipath propagation, Doppler shift, and non-stationary acoustic noise. The architecture of a digital hydroacoustic communication system using the binary frequency shift keying (FSK) method in the ultrasonic range of 30-35 kHz is proposed. Based on the fundamental sonar equation, a detailed calculation of the acoustic budget is performed, confirming the technical feasibility of the system with a source level of 140 dB. A block diagram of the receiving path is developed, including a low-noise amplifier, a 4th-order Butterworth bandpass filter, and a digital demodulator based on FFT. A data transmission protocol using packet transmission, start-stop bits, and a dictionary of four basic commands is proposed. The impact of multipath propagation and noise on the signal shape is assessed through mathematical modeling. Simulation results demonstrate that at  $SNR \geq 12$  dB, the system provides a bit error rate (BER) of less than  $10^{-3}$ . The conclusions of the work indicate the prospects of the chosen approach for creating compact, energy-efficient, and noise-immune systems for operational control of AUVs in coastal zones.*

**Keywords:** autonomous unmanned underwater vehicle (AUV), hydroacoustic communication, frequency shift keying (FSK), acoustic budget, multipath propagation, noise immunity, digital signal processing, shallow water.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Urick R. J. Principles of Underwater Sound. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1983. 423 p.
2. Kaushal H., Kaddoum G. Underwater Optical Wireless Communication. IEEE Access. 2016. Vol. 4. P. 1518–1547.
3. Stojanovic M. Recent advances in high-speed underwater acoustic communications. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1996. Vol. 21, no. 2. P. 125–136.
4. Zielinski A., Young-Hoon Y., Lixue W. Performance analysis of digital acoustic communication in a shallow water channel. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1995. Vol. 20, no. 4. P. 293–299.
5. Stojanovic M. Underwater acoustic communications: Design considerations on the physical layer. Fifth Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services (WONS). 2008. P. 1–10.

6. Stojanovic M., Preisig J. Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization. *IEEE Communications Magazine*. 2009. Vol. 47, no. 1. P. 84–89.
7. Proakis J. G., Salehi M. *Digital Communications*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2008.
8. Catipovic J. A. Performance limitations in underwater acoustic telemetry. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1990. Vol. 15, no. 3. P. 205–216.
9. Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. 2nd ed. Prentice Hall, 2001.
10. Yang T. C. Properties of underwater acoustic communication channels in shallow water. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2012. Vol. 131, no. 1. P. 129–145.
11. Kilfoyle D. B., Baggeroer A. B. The state of the art in underwater acoustic telemetry. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2000. Vol. 25, no. 1. P. 4–27.
12. Sharif B. S., Neasham J., Hinton O. R. A computationally efficient Doppler compensation system for underwater acoustic communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2000. Vol. 25, no. 1. P. 52–61.
13. Ainslie M. A., McColm J. G. A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1998. Vol. 103. P. 1671–1672.
14. Haykin S. *Communication Systems*. 5th ed. John Wiley & Sons, 2009.
15. Green M. D., Rice J. A. Channel-tolerant FH-FSK acoustic signaling for undersea communications and networks. *Proceedings of OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*. 2000. Vol. 2. P. 1067–1074.

#### REFERENCES

1. Urlick R. J. *Principles of Underwater Sound*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1983. 423 p.
2. Kaushal H., Kaddoum G. Underwater Optical Wireless Communication. *IEEE Access*. 2016. Vol. 4. P. 1518–1547.
3. Stojanovic M. Recent advances in high-speed underwater acoustic communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1996. Vol. 21, no. 2. P. 125–136.
4. Zielinski A., Young-Hoon Y., Lixue W. Performance analysis of digital acoustic communication in a shallow water channel. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1995. Vol. 20, no. 4. P. 293–299.
5. Stojanovic M. Underwater acoustic communications: Design considerations on the physical layer. *Fifth Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services (WONS)*. 2008. P. 1–10.
6. Stojanovic M., Preisig J. Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization. *IEEE Communications Magazine*. 2009. Vol. 47, no. 1. P. 84–89.
7. Proakis J. G., Salehi M. *Digital Communications*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2008.
8. Catipovic J. A. Performance limitations in underwater acoustic telemetry. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1990. Vol. 15, no. 3. P. 205–216.
9. Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. 2nd ed. Prentice Hall, 2001.
10. Yang T. C. Properties of underwater acoustic communication channels in shallow water. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2012. Vol. 131, no. 1. P. 129–145.
11. Kilfoyle D. B., Baggeroer A. B. The state of the art in underwater acoustic telemetry. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2000. Vol. 25, no. 1. P. 4–27.
12. Sharif B. S., Neasham J., Hinton O. R. A computationally efficient Doppler compensation system for underwater acoustic communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2000. Vol. 25, no. 1. P. 52–61.
13. Ainslie M. A., McColm J. G. A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1998. Vol. 103. P. 1671–1672.
14. Haykin S. *Communication Systems*. 5th ed. John Wiley & Sons, 2009.
15. Green M. D., Rice J. A. Channel-tolerant FH-FSK acoustic signaling for undersea communications and networks. *Proceedings of OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*. 2000. Vol. 2. P. 1067–1074.