

Тема 5. КОДУВАННЯ ДЖЕРЕЛА НЕПЕРЕРВНИХ ПОВІДОМЛЕНЬ

5.1 Загальні принципи кодування неперервних повідомлень: аналого-цифрове (АЦП) та цифро-аналогове (ЦАП) перетворення.

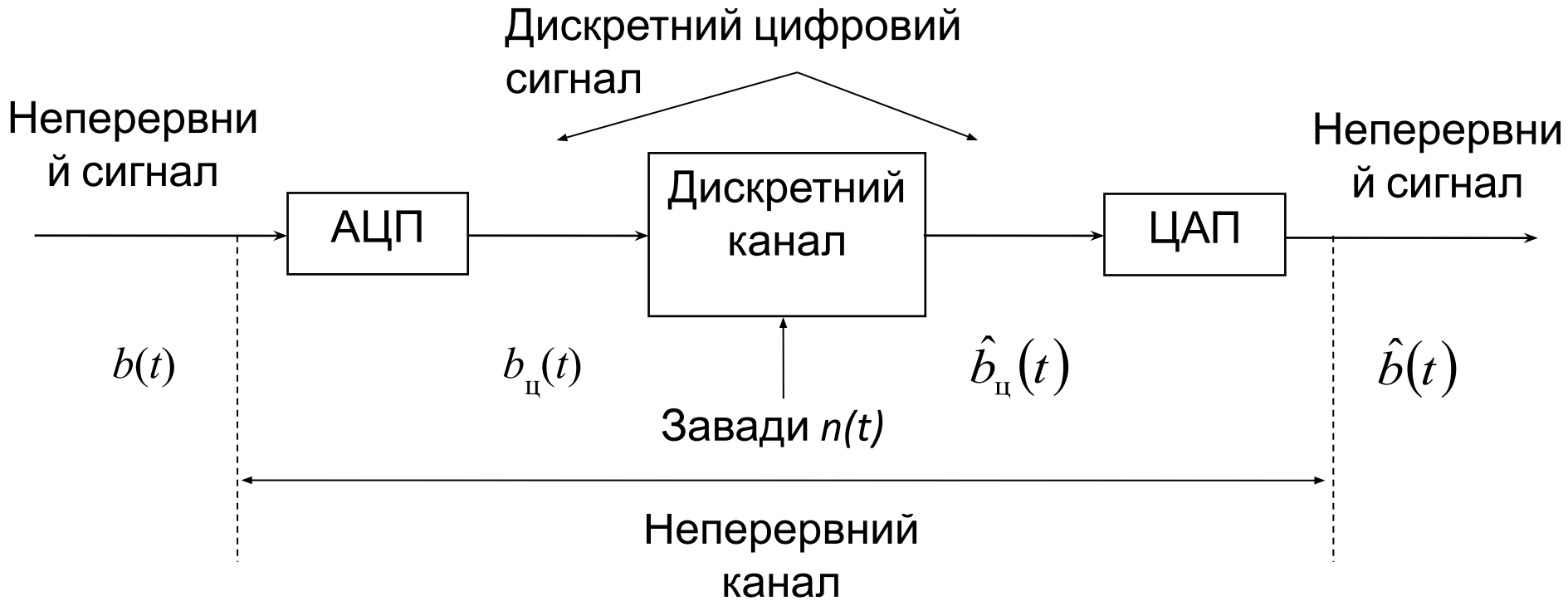
5.2 Кодування за методом імпульсно-кової модуляції (ІКМ): структура АЦП та ЦАП.

5.3 Методи кодування з лінійним передбаченням – ДІКМ та ДМ. Поняття про адаптивні ДІКМ та ДМ.

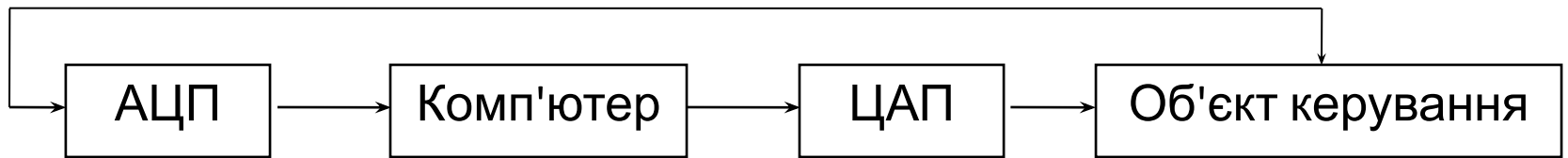
5.1 Загальні принципи кодування неперервних повідомлень: аналого-цифрове (АЦП) та цифро-аналогове (ЦАП) перетворення

Для **кодування** неперервних повідомлень враховуються той факт, що джерело неперервних повідомлень виконує перетворення повідомлення $a(t)$ в електричний первинний сигнал $b(t)$, який прийнято називати **аналоговим**. Кодування первинного аналогового сигналу $b(t)$ призначено для його передавання цифровими каналами.

Передавання неперервних сигналів дискретним каналом у вигляді послідовності дискретних символів того чи іншого алфавіту дістала назву **цифрової передачі неперервних сигналів**. Для організації цифрової системи передачі неперервний (аналоговий) сигнал перетворюється в цифровий за допомогою **аналого-цифрового перетворювача (АЦП)** на передавальній стороні, а на приймальній стороні здійснюється зворотне перетворення цифрового сигналу в аналоговий **цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП)**.



Структурна схема цифрової системи передачі неперервних сигналів



Аналого-цифровий і цифро-аналоговий перетворювачі в системі керування

Основні *переваги* ЦСП:

- більш висока завадостійкість, що яскраво виявляються в системах зв'язку з багаторазовою ретрансляцією (переприйманням);
- можливість широкого застосування новітньої елементної бази цифрової обчислювальної техніки та мікропроцесорів;
- із впровадженням ЦСП з'явилися умови для об'єднання методів передавання різних повідомлень на цифровій основі;
- простота спряження цифрового каналу та цифрових систем комутації.

Будь-який метод цифрового передавання неперервних повідомлень характеризується **швидкістю цифрового сигналу**

$$R_{\text{ц}} = 1/T_{\text{с}} \text{ [біт/с]}$$

і **якістю відновлення повідомлення** після передавання (допустимим відношенням сигнал/шум квантування).

В ЦСП ставиться задача – задовольнити вимозі за якістю відновлення повідомлення при мінімальній швидкості цифрового сигналу (зменшення швидкості цифрового сигналу призводить до зменшення витрат основних ресурсів каналу зв'язку – смуги пропускання каналу і потужності сигналу в каналі). Це призвело до розроблення великої кількості цифрових методів передавання неперервних повідомлень.

З інформаційної точки зору всі запропоновані нині методи перетворення аналог-цифра для ЦСП можна поділити на дві групи:

– перетворення **без втрат** інформації, що міститься в аналоговому сигналі

$$R_{\text{ц}} \geq R_{\text{дж}} ;$$

– перетворення **з втратами** частини інформації, що міститься в аналоговому сигналі

$$R_{\text{ц}} < R_{\text{дж}}.$$

З технічної точки зору всі застосовувані нині методи перетворення аналог-цифра для ЦСП можна поділити на дві групи:

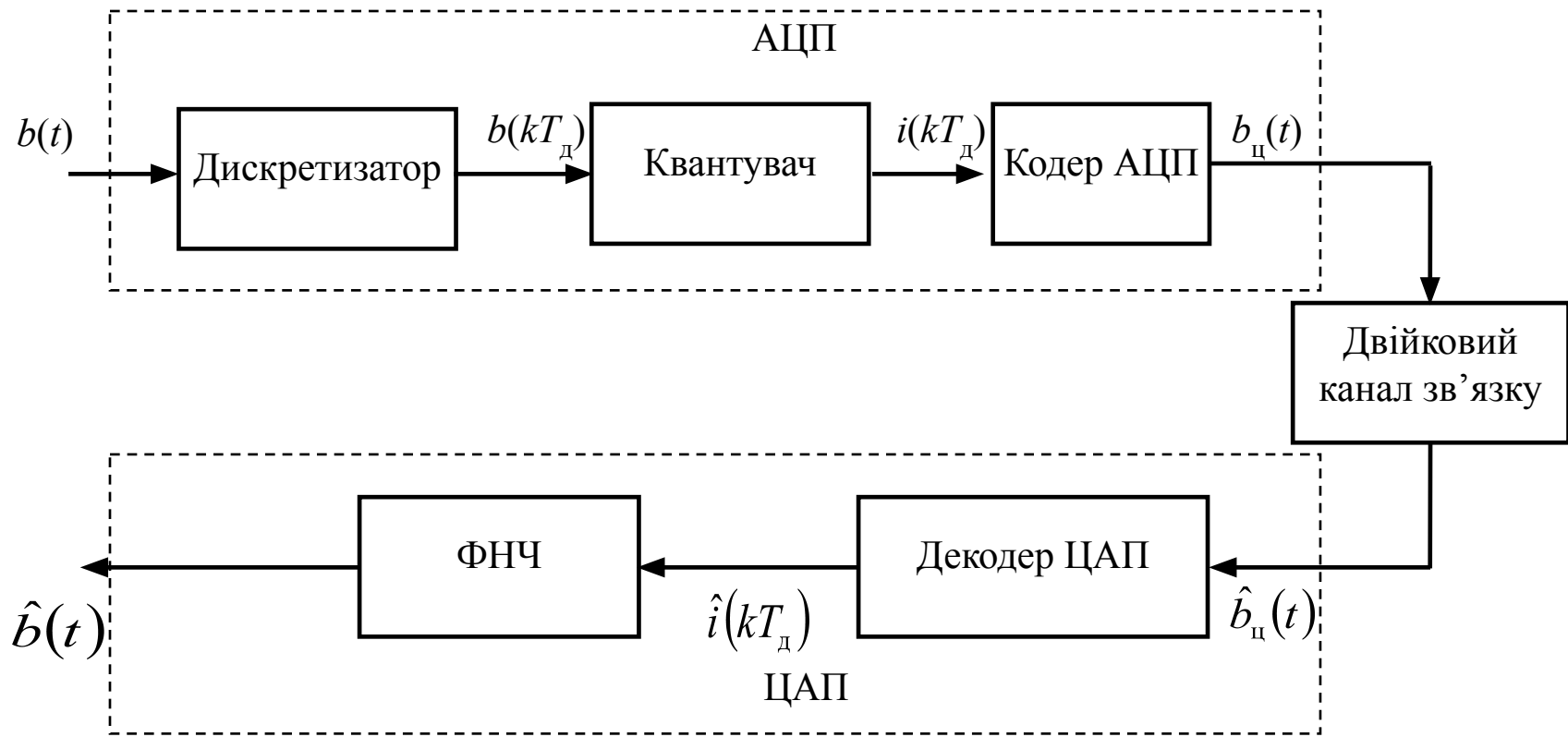
– **без зміни форми** аналогового сигналу, реалізується, в основному, при ІКМ;

– **зі зміною форми** аналогового сигналу, реалізується в системах з передбаченням, вокодерах, при стисненні відео або аудіо сигналів.

5.2 Кодування за методом імпульсно-кової модуляції

Особливістю *методу ІКМ* є те, що кожний відлік представляється цифровим сигналом незалежно від інших відліків.

Усі методи цифрового передавання аналогових сигналів відрізняються способами представлення дискретних сигналів цифровими. Перетворювач відліків у цифровий сигнал називається кодером цифрової системи передавання (ЦСП), а перетворювач цифрового сигналу у відліки – декодером ЦСП.



Система цифрової передачі неперервних повідомлень
методом ІКМ

Аналого-цифрове перетворення при ІКМ. В ІКМ аналоговий первинний сигнал перетворюється в цифровий за допомогою трьох операцій: *дискретизації за часом, квантування за амплітудою (рівнем) та кодування.* Таким чином, АЦП ІКМ має містити дискретизатор, квантувач та кодуєчий пристрій.



Аналого-цифровий перетворювач ІКМ

При будь-якому методі цифрового передавання аналоговий сигнал $b(t)$, передусім, перетворюється в дискретний сигнал, що представляє собою послідовність відліків $b(kT_{\text{д}})$, узятих через інтервал дискретизації

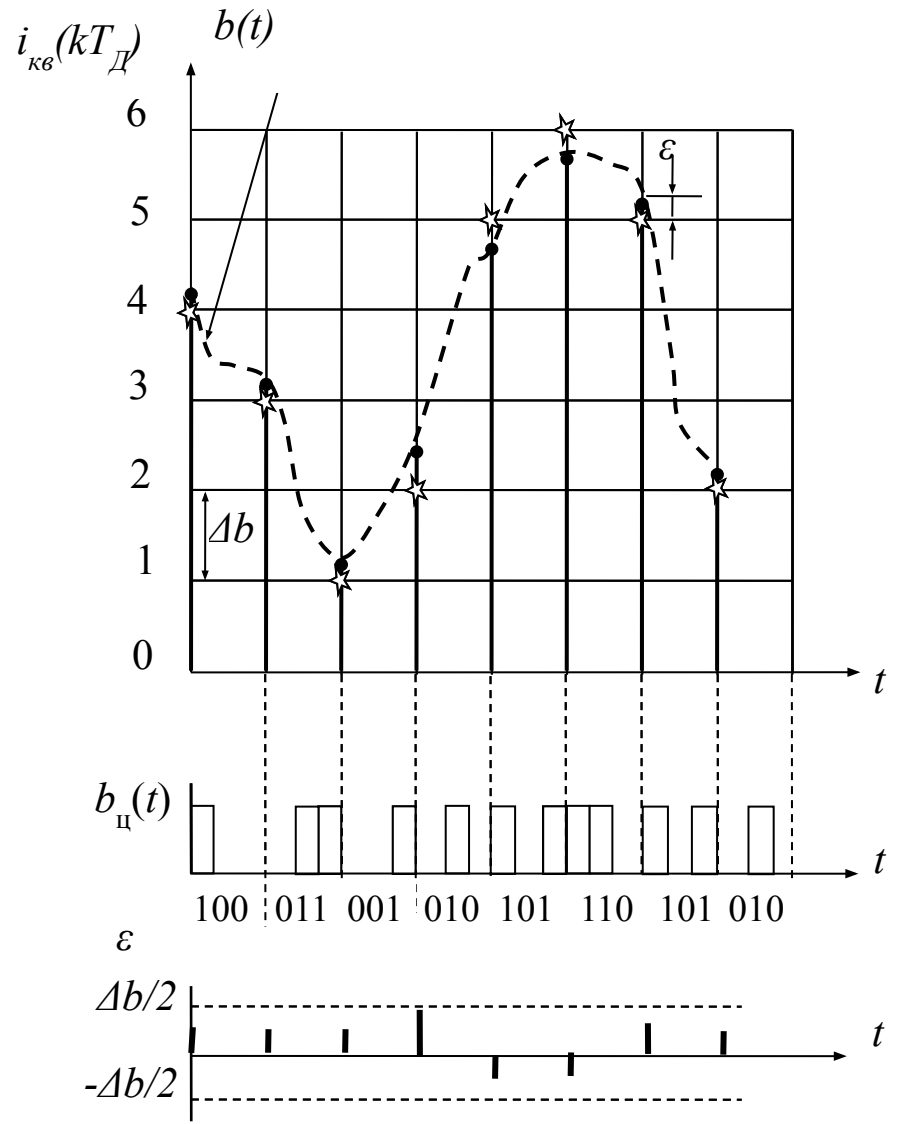
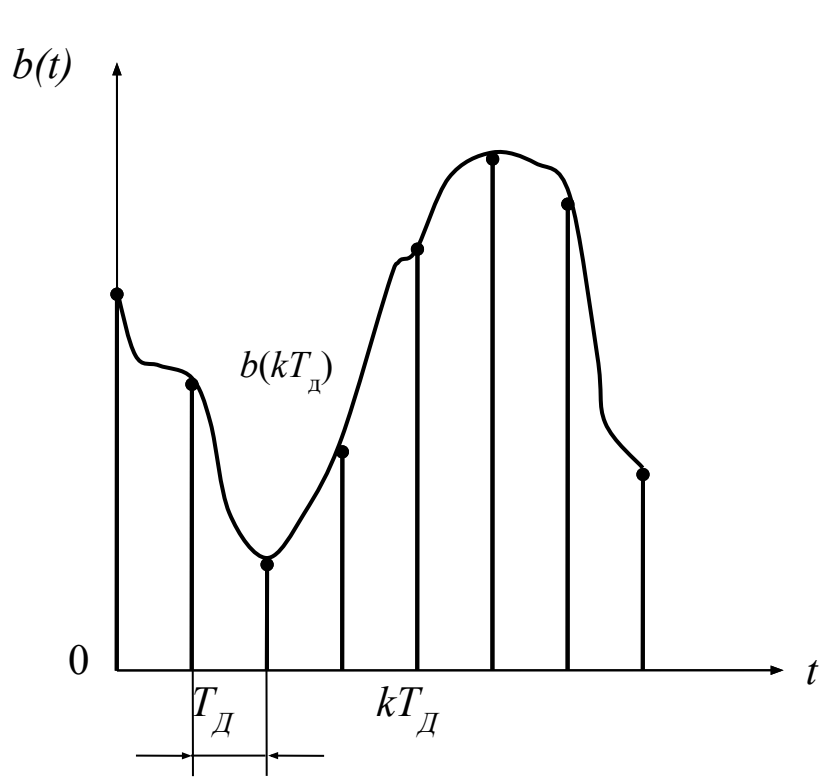
$$T_{\text{д}} \leq 1/(2F_{\text{max}}),$$

де F_{max} – максимальна частота спектра сигналу $b(t)$.

Це перетворення називається **дискретизацією сигналу за часом**, а пристрій для її здійснення – **дискретизатором**. Частота дискретизації має бути не менше подвоєної частоти F_{max} :

$$f \equiv 1/T \geq 2F$$

Згідно з теоремою Котельникова, виконання цього співвідношення гарантує можливість точного відновлення аналогового сигналу за відліками. Таке відновлення здійснюється ФНЧ із частотою зрізу F_{\max} .



Часові діаграми перетворення неперервного сигналу в цифровий сигнал ІКМ

Основний параметр квантувача – число рівнів квантування L . При рівномірному квантуванні діапазон значень b від b_{\min} до b_{\max} розбивається на $L - 1$ інтервалів величиною

$$\Delta b = (b_{\max} - b_{\min}) / (L - 1),$$

яка називається кроком квантування.

При квантуванні кожен відлік $b(kT_{\text{д}})$ округляється до найближчого дискретного значення b_i , а на вихід квантувача надходить ціле число $i(kT_{\text{д}})$. Представлення відліку $b(kT_{\text{д}})$ дискретним значенням b_i вносить похибку

$$\varepsilon_{\text{кв}}(kT_{\text{д}}) = i(kT_{\text{д}}) \cdot \Delta b - b(kT_{\text{д}}),$$

яка називається шумом квантування.

У кодері АЦП, числа $i(kT_{\text{д}})$ представляються заданим двійковим кодом. Довжина коду визначається співвідношенням:

$$n = \log_2 L.$$

Цифровий сигнал на виході кодера $b_{\text{ц}}(t)$ має швидкість

$$R = n \cdot f_{\text{д}}.$$

Декодер з цифрового сигналу $b_{\text{ц}}(t)$ формує числа $i(kT_{\text{д}})$, за якими відновлюються квантовані відліки:

$$i(kT_{\text{д}}) \cdot \Delta b = b_{\text{кв}}(kT_{\text{д}}) = \hat{b}(kT_{\text{д}})$$

Середній квадрат похибки квантування
(*середня потужність шуму квантування*)
визначається кроком квантування

$$\overline{\varepsilon_{\text{КВ}}^2} = \frac{(\Delta b)^2}{12}$$

а відношення сигнал/шум квантування

$$\rho_{\text{КВ}} = \frac{P_b}{\overline{\varepsilon_{\text{КВ}}^2}} = \frac{3(L-1)^2}{K_A^2}$$

де K_A – коефіцієнт амплітуди аналогового сигналу.

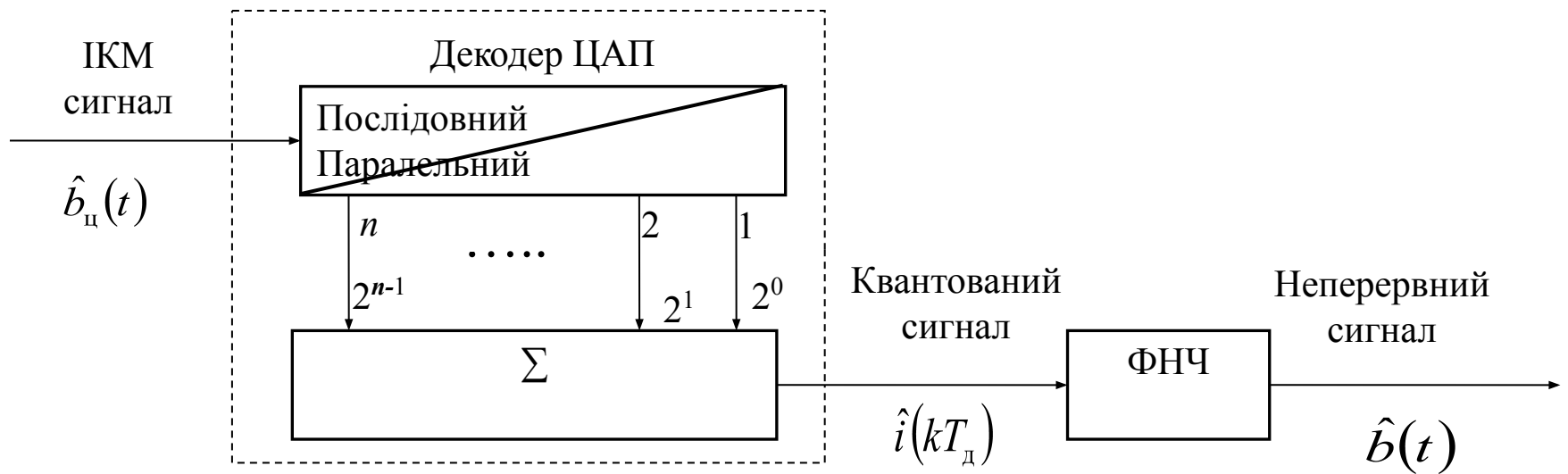
Число рівнів квантування для рівномірного коду –

$$L \geq \sqrt{K_A^2 \rho_{\text{КВ,доп}} / 3} + 1$$

Коди ІКМ. Найчастіше кодування зводиться до запису номера рівня у двійковій системі числення (*натуральний двійковий код*). У системах зв'язку з ІКМ застосовують й інші двійкові коди (наприклад, Грея або симетричний), які надають більшої захищеності системам ІКМ від помилок.

Цифро-аналогове перетворення при ІКМ.

Зворотнє перетворення цифрового сигналу в неперервний при ІКМ здійснюється декодером та ФНЧ. До складу декодера входить перетворювач послідовного коду в паралельний, на виході якого з'являється набір одиниць та нулів прийнятої кодової комбінації.



Цифро-аналоговий перетворювач ІКМ

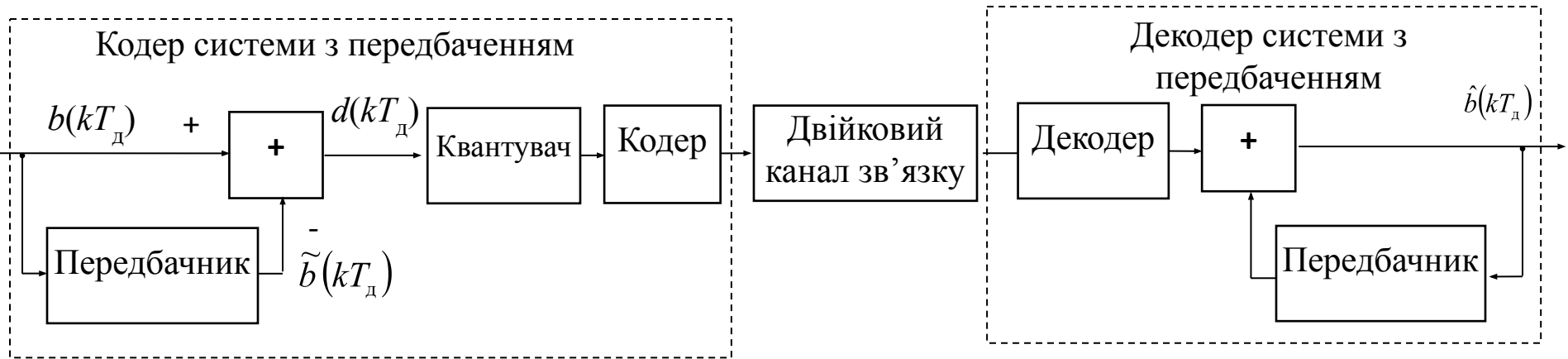
Методи підвищення завадостійкості ІКМ.

1. Збільшення числа рівнів квантування (відповідно зменшується крок квантування), але при цьому зростає довжина кодових комбінацій і розширюється спектр ІКМ-сигналу.

2. Застосування нерівномірного кроку квантування. Широко використовуються методи ІКМ з нерівномірним квантуванням: в області великих значень $|b|$ кроки квантування більші і навпаки. Це еквівалентно нелінійному перетворенню відліків з наступним рівномірним квантуванням. За рахунок такого перетворення зменшується K_A і зростає $\rho_{\text{КВ}}$ при незмінному числі L , або, зберігаючи значення $\rho_{\text{КВ}}$, можна зменшити число L , довжину коду n і швидкість цифрового сигналу R .

5.3 Методи кодування з лінійним передбаченням – ДІКМ та ДМ. Поняття про адаптивні ДІКМ та ДМ.

При цифрових методах передавання частота дискретизації вибирається за умови відсутності накладення складових спектра дискретного сигналу. За такої умови відліки реальних аналогових сигналів є корельованими. Це дозволяє з тією чи іншою точністю передбачувати значення чергового відліку сигналу за значеннями попередніх відліків. У кодері системи передавання із передбаченням обчислюється помилка передбачення.



Кодер і декодер системи з передбаченням

У кодері системи передавання із передбаченням обчислюється помилка передбачення

$$d(kT_d) = b(kT_d) - \tilde{b}(kT_d)$$

де $b(kT_d)$ – відлік аналогового сигналу, що надходить від дискретизатора;

$\tilde{b}(kT_d)$ – передбачений відлік, сформований передбачником на основі N попередніх відліків

$$b((k-1)T_d), b((k-2)T_d), \dots, b((k-N)T_d).$$

Розмах дискретного сигналу $d(kT_{\text{д}})$ менший, ніж розмах сигналу $b(kT_{\text{д}})$, тому число рівнів квантування L при незмінному кроці квантування Δd буде меншим, ніж при передаванні відліків $b(kT_{\text{д}})$ методом ІКМ. Зменшення числа рівнів квантування зменшує довжину коду n і швидкість цифрового сигналу $R = n \cdot f_{\text{д}}$.

Або, при незмінному числі рівнів квантування L зменшується крок квантування

$$\Delta d = (d_{\text{max}} - d_{\text{min}}) / L,$$

зменшується потужність шуму квантування

$$P_{\text{ш кв}} = \Delta d^2 / 12,$$

зростає відношення сигнал/шум квантування $\rho_{\text{кв}}$.

Принцип кодування аналогових сигналів за методом ДІКМ.

Найпоширеніша система із передбаченням – система з диференційною ІКМ (ДІКМ). У різних варіантах використання методу ДІКМ число відліків N , на основі яких визначаються передбачені відліки, перебуває в межах від 1 до 6.

У випадку $N = 1$ передбаченим відліком є попередній відлік:

$$\tilde{b}(kT_{\text{д}}) = b((k-1)T_{\text{д}})$$

Визначимо середню потужність помилки передбачення

$$\begin{aligned} P_d &= \overline{d^2(kT_d)} = \overline{[b(kT_d) - b((k-1)T_d)]^2} = \overline{b^2(kT_d)} - 2\overline{b(kT_d)b((k-1)T_d)} + \overline{b^2((k-1)T_d)} = \\ &= P_b - 2P_b R_b(T_d) + P_b = 2P_b(1 - R_b(T_d)) \end{aligned}$$

де P_b – середня потужність сигналу $b(t)$;
 $R_b(T_d)$ – значення нормованої кореляційної функції розмовного сигналу.

Оцінимо у скільки разів середня потужність помилки передбачення менша за середню потужність сигналу розмовного сигналу, якщо

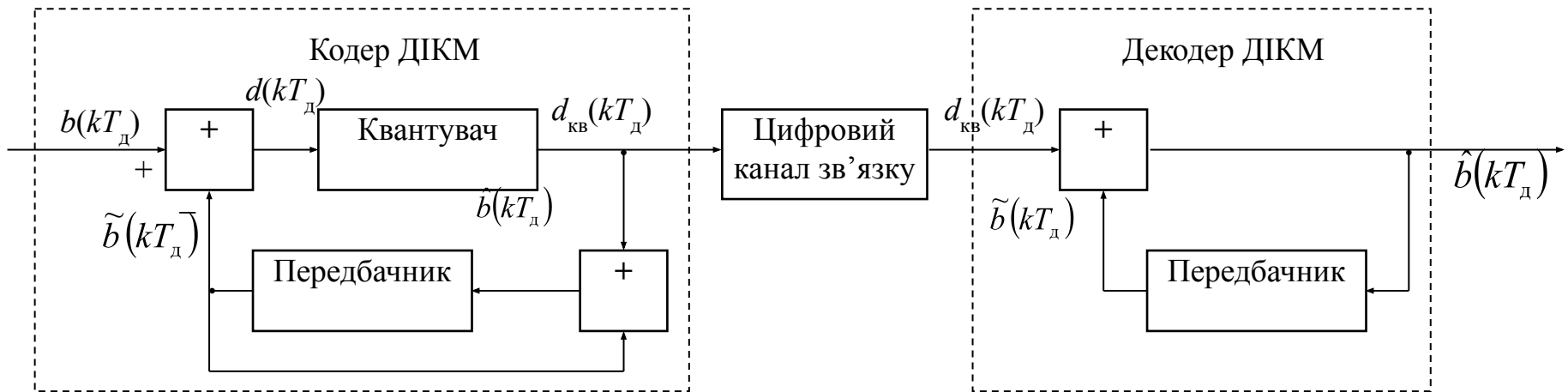
$$T_{\text{д}} = 125 \text{ мкс і } R_b(T_{\text{д}}) = 0,85.$$

Тоді

$$P_b/P_d = 2(1 - R_b(T_{\text{д}})) = 3,3.$$

У першому наближенні можна вважати, що розмах дискретного сигналу $d(kT_{\text{д}})$ менший, ніж розмах сигналу $b(kT_{\text{д}})$ у $\sqrt{3,3} \approx 1,8$ раз, тобто приблизно удвічі.

У Схемі кодера помилка передбачення надходить на квантувач, аналогічний квантувачу системи з ІКМ, потім помилка квантування $d_{\text{кв}}(kT_{\text{д}})$ передається цифровим сигналом каналом зв'язку. Передбачники в кодері й декодері повністю ідентичні.



Кодер і декодер системи передавання з ДІКМ

Визначимо похибку квантування при ДІКМ.

$$\varepsilon_{\text{кв}}(kT_{\text{д}}) = \hat{b}(kT_{\text{д}}) - b(kT_{\text{д}}) = [\tilde{b}(kT_{\text{д}}) + d_{\text{кв}}(kT_{\text{д}})] - [\tilde{b}(kT_{\text{д}}) + d(kT_{\text{д}})] = d_{\text{кв}}(kT_{\text{д}}) - d(kT_{\text{д}})$$

З співвідношення видно, що, завдяки увімкненню передбачника в кодері у коло зворотного зв'язку, похибка квантування визначається лише параметрами квантувача, і немає ефекту накопичення шумів квантування в декодері.

Широко застосовуються методи передавання адаптивної ДІКМ (АДІКМ). У процесі роботи кодера АДІКМ адаптивними є:

- ✓ передбачник з $N = 4 \dots 6$ – його коефіцієнти (а це нерекурсивний фільтр) автоматично налаштовуються так, щоб дисперсія сигналу $d(kT_{\text{д}})$ мінімізувалася, коефіцієнти передбачника передаються каналом зв'язку, щоб у передбачнику декодера встановлювалися такі ж коефіцієнти, як і в передбачнику кодера;
- ✓ квантувач – розхил його характеристики $(d_{\text{max}}, d_{\text{min}})$ і відповідно крок квантування змінюються відповідно до розмаху поточної реалізації сигналу $d(kT_{\text{д}})$, відомості про крок квантування передаються каналом зв'язку, щоб у декодері встановлювався крок квантування такий же, як і в квантувачі.

Принцип кодування аналогових сигналів за методом ДМ

Методи ДМ відносяться до методів передавання із передбаченням. Методи ДМ відрізняються від ІКМ і ДІКМ тим, що використовуються дворівневі квантувачі ($L = 2$). Це стає можливим, якщо частота дискретизації вибирається в кілька разів більшою, ніж $2F_{\max}$, і сусідні відліки з дискретизатора мало відрізняються.

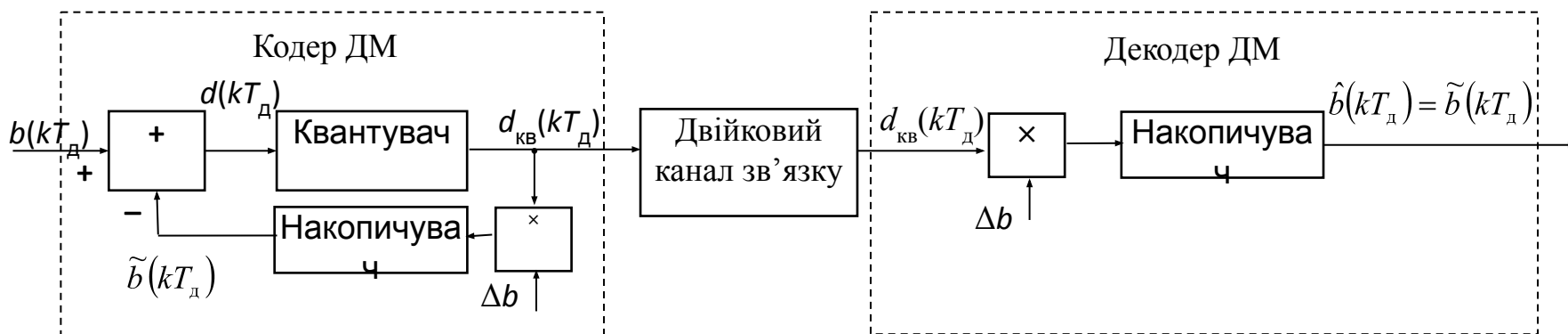
Похибка передбачення у ДМ обчислюється так само, як і при ДІКМ, а передбачений відлік є результатом роботи накопичувача

$$\tilde{b}(kT_{\text{д}}) = \sum_{i=0}^{k-1} d_{\text{кв}}(iT_{\text{д}}) \cdot \Delta b$$

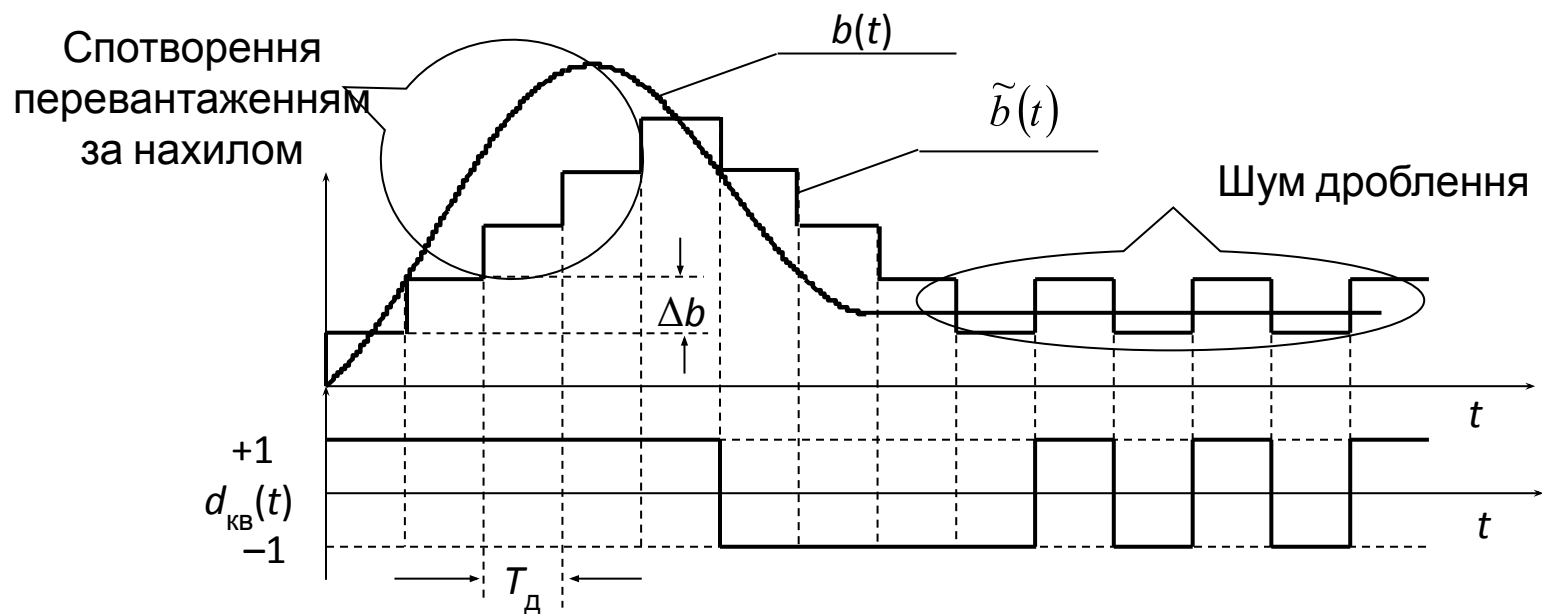
де Δb – коефіцієнт;

$$d_{\text{кв}}(kT_{\text{д}}) = \begin{cases} +1, & \text{якщо } d(kT_{\text{д}}) \geq 0, \\ -1, & \text{якщо } d(kT_{\text{д}}) < 0 \end{cases}$$

похибка передбачення квантується на два рівні, які передаються двійковим каналом зв'язку.



Кодер і декодер ДМ



Ілюстрація роботи кодера ДМ

передбачуваного сигналу.

На основі опису роботи кодера й декодера ДМ можна сформулювати особливості методів передавання із ДМ:

- ✓ частота дискретизації дискретизатора f_d у кілька разів більша за $2F_{\max}$;
- ✓ оскільки квантувач дворівневий, то $n = 1$, і $R_{\text{ц}} = f_d$;
- ✓ оскільки $n = 1$, то відпадає необхідність синхронізації декодера.

При адаптивній дельта-модуляції (АДМ) може змінюватися крок квантування. Виконується це в такий спосіб. На виході кодера вмикається аналізатор послідовності двійкових символів. Якщо зустрілася послідовність 111 або 000, то крок квантування збільшується, щоб зменшити спотворення від перевантаження за нахилом. Якщо зустрілася послідовність 101 або 010, то крок квантування зменшується, щоб зменшити спотворення від шумів дроблення. Аналогічний аналізатор вмикається на вході декодера й у такий же спосіб змінюється крок квантування в декодері.

Оскільки людина, як одержувач інформації, є ключовим елементом будь-якої системи для передавання мови, то якість передавання часто оцінюється за суб'єктивним сприйняттям мови. Критерій середньої експертної оцінки (CEO) (MOS – mean opinion score) використовується як альтернатива об'єктивному середньоквадратичному критерію, який не повною мірою відображає дійсну якість відновленої мови. Випробування для одержання CEO групою експертів проводяться на репрезентативному розмовному матеріалі, який вимовляється дикторами з різними голосами. У тестах повинна брати участь достатня кількість непідготовлених слухачів (мінімум 40), щоб отримані ними висновки були представницькими.

Методика обчислення CEO регламентована рекомендаціями Європейського інституту стандартів у галузі телекомунікацій для оцінки якості передавання розмовних сигналів у телефонних мережах. У відповідності до цих рекомендацій виділено 5 рівнів

Опис рівнів якості

Опис рівня	Оцінка	Ступінь зусиль при сприйнятті
Відмінний	5	Без зусиль
Хороший	4	Немає відчутних зусиль
Допустимий	3	Помірні зусилля
Слабий	2	Значні зусилля
Поганий	1	Губиться сприйняття при фізично можливих зусиллях

Оцінки якості:

- ✓ від 5 до 4 рекомендовані для **телефонних мереж**;
- ✓ від 4 до 3,5 вважаються допустимими у таких додатках як **голосова пошта і рухомий зв'язок**;
- ✓ від 3,5 до 2,5 допустимі для **синтезованої мови**.

У загальному випадку значення СЕО якості розмовного сигналу спадає при зниженні швидкості цифрового сигналу.

Значення СЕО розповсюджених типів кодерів мови

Тип кодера	Значення СЕО
64 кбіт/с; ІКМ	4,3
14,4 кбіт/с; QCELP13	4,2
32 кбіт/с; АДІКМ	4,1
8 кбіт/с; ITU-CELP	3,9
8 кбіт/с; CELP	3,7
13 кбіт/с; GSM	3,54
9,6 кбіт/с; QCELP	3,45
4,8 кбіт/с; CELP	3,0
2,4 кбіт/с; LPC	2,5

Примітка.

QCELP	Qualcom Code Excited Linear Predictor (кодер на основі лінійного передбачення з кодовим збудженням фірми Qualcom);
ITU-CELP	International Telecommunication Union – Code Excited Linear Predictor (Міжнародний союз електрозв'язку – кодер на основі лінійного передбачення з кодовим збудженням);
GSM	Global System Mobile (глобальна система рухомого зв'язку);
LPC	Linear Predictive Coder (кодер на основі лінійного передбачення).