

Кафедра автоматизації  
технологічних процесів  
і виробництв

Лабораторна робота № 2  
з курсу  
”Цифрова обробка сигналів”

Дослідження шумів аналого-  
цифрового перетворювача та  
способи їх зменшення

Методичні вказівки до лабораторної роботи № 2 "Дослідження шумів аналого-цифрового перетворювача та способи їх зменшення" з курсу "Цифрова обробка сигналів". Автори: Пісьціо В.П., Медвідь В.Р. Тернопіль: ТНТУ, 2017 - 13 с.

Для студентів напрямку: 6.050201 "Системна інженерія "

Автори: Пісьціо В.П., Медвідь В.Р.

Розглянуто і затверджено на засіданні кафедри автоматизації технологічних процесів і виробництв (протокол № 1 від 22.08.2017 року)

## Тема роботи

Дослідження шумів аналого-цифрового перетворювача та способи їх зменшення

## Мета роботи

Закріпити на практиці основні поняття, пов'язані з математичними моделями та стохастичними властивостями шумів квантування дискретних сигналів, зокрема, на виході аналого-цифрового перетворювача

## Теоретичні відомості

### Аналоговий сигнал

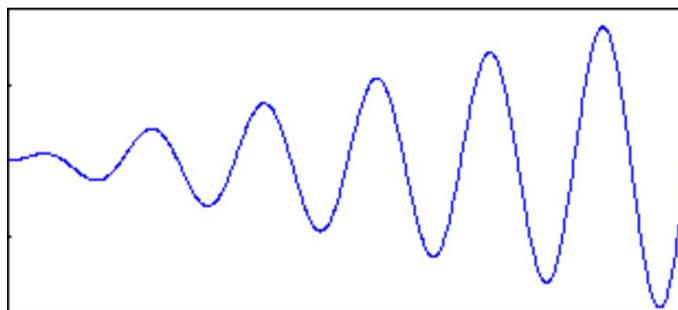


Рис. 1. Аналоговий сигнал

За представленням сигнали розділяють на аналогові, дискретні, квантовані та цифрові.

Більшість сигналів мають аналогову природу, тобто змінюються неперервно від незалежної величини (часу) та можуть приймати довільні значення на деякому інтервалі. Аналогові сигнали часто можна описати деякою математичною функцією часу. Наприклад:

$$s(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi).$$

Аналогові сигнали використовуються у телефонії, радіомовленні, телебаченні. Перевести такий сигнал без похибки у цифрову форму не можливо, так як на будь-якому інтервалі часу він може мати нескінчену множину значень і для точного представлення його значень необхідно число нескінченної розрядності. Тому найчастіше необхідно перетворювати аналоговий сигнал так, щоб можна було представити його послідовністю чисел заданої розрядності.

### Дискретний сигнал

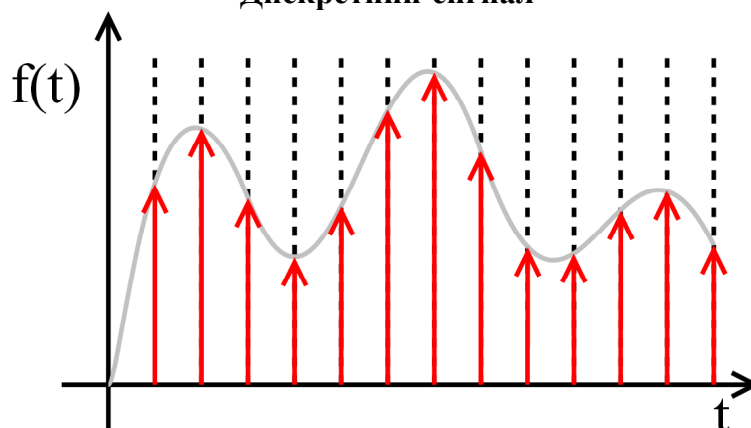


Рис. 2. Дискретний сигнал

Дискретизація аналогового сигналу полягає у тому, що сигнал представляється у вигляді послідовності значень, що взяті у дискретні моменти часу  $t_i$  (где  $i$  — індекс). Зазвичай проміжки часу між послідовними відліками ( $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ ) є сталими і тоді,  $\Delta t = T$  називають інтервалом дискретизації. Самі ж значення сигналу  $x(t)$  в моменти вимірювання, тобто  $x_n = x(T \cdot n)$ , називають відліками.

Миттєві значення  $x[nT]$  називаються вибірками, або відліками, час  $T$  - періодом (інтервалом, кроком) дискретизації,  $n$  вказує порядковий номер відліку. Очевидно, що чим частіше брати відліки, тобто чим менший період дискретизації  $T$ , тим точніше послідовність відліків  $x[nT]$  відобразить сигнал  $x(t)$ . Період дискретизації  $T$  визначає частоту дискретизації  $f_d$ , яка дорівнює:  $f_d = \frac{1}{T}$ .

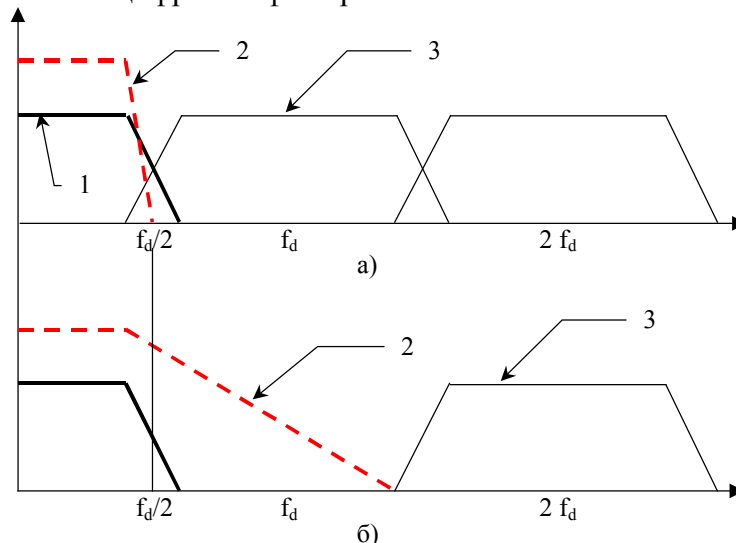
Чим менше  $T$  тим вище  $f_d$ . З іншого боку, чим вища частота дискретизації, тим важче

обчислювачу виконувати велику кількість операцій над відліками в темпі їхнього надходження на переробку і тим складнішою повинна бути його будова.

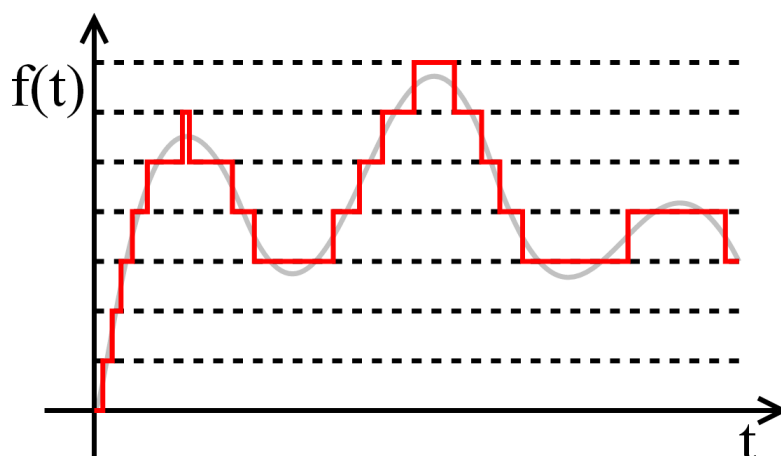
Отже, точність представлення сигналу вимагає збільшення  $f_d$ , а прагнення зробити обчислювач якомога простішим приводить до бажання її понизити. Якщо брати відліки дуже рідко, то у випадку швидкозмінного сигналу вони не міститимуть інформації, достатньої для його ідентифікації.

Швидкість зміни сигналу характеризується верхньою частотою його спектра. У відповідності до теореми Котельникова-Найквіста будь-який неперервний сигнал з фінітним спектром (тобто таким спектром, в якому спектральні складові, що відповідають частотам вище або рівним деякій частоті, відсутні) може бути поданим у вигляді відліків дискретного сигналу з частотою дискретизації  $f_d$ . При цьому таке перетворення є взаємно однозначним, тобто при дотриманні умов теореми Котельникова за дискретним сигналом можна відновити вхідний сигнал з фінітним спектром без спотворень.

Проте на практиці часто зустрічаються сигнали із необмеженим спектром, а порушення умов теореми Котельникова-Найквіста призводить до накладання спектрів і сигнал не може бути повною мірою відновлений з цифрового масиву даних. Це ілюструє рисунок (рис. 3), зображений нижче. На рис. 3а показано накладання спектра корисного сигналу поз. 1 із його копією 3. Тому для застосування такого перетворення потрібні аналогові фільтри низьких частот із різким спадом частотної характеристики (рис. 3а поз. 2). Проте реалізація таких фільтрів досить складна, потребує точних елементів і економічно мало доцільна. Значно простіше підвищити частоту дискретизації вище ніж потрібна максимальна частота і тоді на вході системи достатньо більш простого фільтра (рис. 3б поз. 2), а виділення потрібної частоти можна провести за допомогою цифрових фільтрів.



**Рис. 3. Ефект збільшення частоти дискретизації.  
Квантований сигнал**



**Рис. 4. Квантований сигнал**

При квантуванні вся область значень сигналу розбивається на рівні, кількість котрих залежить від необхідної точності. Віддаль між рівнями, називають кроком квантування  $\Delta$ .

Число цих рівнів рівне  $N$  (від 0 до  $N-1$ ). Кожному рівню присвоюється деяке число. Відліки сигналу порівнюються з рівнями квантування і у якості сигналу обирається найближчий рівень квантування. Кожен рівень квантування найчастіше кодується двійковим числом із  $p$  розрядами. Число рівнів квантування та число двійкових розрядів пов'язані співвідношенням  $p \geq \log_2(N)$ .



**Рис. 5. Цифровий сигнал**

Для представлення аналогового сигналу послідовністю чисел скінченної розрядності, його слід перетворити у дискретний сигнал, а потім здійснити його квантування. В результаті сигнал буде представлений таким чином, що на кожному заданому проміжку часу відомо наближене значення сигналу, що можна записати цілим числом. Послідовність таких чисел і називається цифровим сигналом.

#### Квантування сигналу

По суті квантування, це нелінійне безінерційне перетворення сигналу, тобто

$$y(n) = F[x(n)], \quad (1)$$

де  $x(n)$  -  $n$ -й відлік дискретного сигналу, який представлений  $k$ -розрядним числом у тому числі і нескінченно розрядним;  $y(n)$  -  $n$ -й відлік квантованого сигналу, який представлений  $b$ -розрядним числом;

$F()$ - нелінійна функціональна залежність.

В формулі (1)  $x(n)$  - дискретний сигнал а  $y(n)$  - цифровий сигнал.

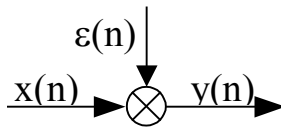
У процесі роботи АЦП може надходити з багатьох джерел. Наприклад, він може бути також обумовлений: температурним шумом, імпульсними перешкодами, зміною напруги живлення і опорної напруги, фазовий шум через зміну тактової частоти оцифровування і шум помилки квантування. Потужність шуму від цих джерел може змінюватися. Для зниження шуму можуть застосовуватися різні техніки, такі як ретельна розводка друкованої плати в місцях розводки сигналів, установка блокувальних конденсаторів і розводка ланцюгів опорного напруги. Проте є шум, що не залежить від ретельності розводки плат і не може бути знижений для даного АЦП меншим за 1 біт розрядності АЦП. Цей шум з'являється через похибку квантування і називається шумом квантування. У АЦП завжди є шум квантування, так що навіть найкращий перетворювач даних буде витратити як мінімум 1 біт на шум квантування, якщо не застосовувати передискретизація.

Оскільки дискретні відліки сигналів зображуються числами (у певній системі числення, як правило двійковий), то квантування сигналів по суті зводиться до наближеного зображення чисел обмеженою кількістю розрядів  $b$ .

Похибка, яка виникає при квантуванні, тобто при переході від дискретного до цифрового сигналу визначається за наступною формулою

$$\varepsilon(n) = y(n) - x(n). \quad (2)$$

Формулу (2) можна переписати так:  $x(n) = y(n) + \varepsilon(n)$  і тоді похибку квантування  $\varepsilon(n)$  можна розглядати як адитивний дискретний випадковий процес, який називають шумом квантування. Такий підхід дає можливість розглядати лінійну модель процесу квантування (рис. 6).



**Рис. 6. Лінійна модель процесу квантування**

Легко можна зрозуміти, що шум квантування володіє наступними властивостями:

- ◇ шум квантування ніяк не залежить від значення  $y(n)$  – послідовність  $\varepsilon(n)$  не корельована з послідовністю  $y(n)$ .
- ◇ значення  $\varepsilon(n)$  ніяк не залежить ні від номера  $n$ , ні від попередніх значень  $\varepsilon(n)$ , а всі статистичні характеристики випадкової величини  $\varepsilon(n)$  не залежать від часу, тобто випадкова величина – ергодична.
- ◇ характеристики розподілу випадкової величини описується неперервним рівномірним розподілом на інтервалі, довжина якого дорівнює кроку квантування  $Q = 2^{-b}$ .

Якщо на вхід АЦП поступає випадково змінний сигнал із амплітудою, що при кожному новому вимірюванні змінює хоча б молодшу цифру на виході шум квантування можна вважати білим шумом – його енергія рівномірно розподілена на інтервалі частот від 0 до половини частоти дискретизації.

Найчастіше квантування сигналу виконується двома способами: округлюванням і відкиданням розрядів. У першому випадку число  $x(n)$  замінюється найближчим до нього  $b$ -розрядним числом  $y(n)$ . У цьому випадку шум квантування  $\varepsilon(n)$  має рівномірний розподіл на інтервалі  $[-\Delta/2, \Delta/2]$  з законом розподілу випадкового значення заданим формулою:

$$p_{\varepsilon}(x) = \begin{cases} 1/\Delta & \text{якщо } x \in [-\Delta/2, \Delta/2] \\ 0 & \text{якщо } x \notin [-\Delta/2, \Delta/2] \end{cases}$$

Тоді математичне сподівання випадкової величини

$$a = M(\varepsilon(n)) = \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} x \cdot p_{\varepsilon}(x) dx = \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} \frac{x}{\Delta} dx = \frac{x^2}{2\Delta} \Big|_{-\Delta/2}^{\Delta/2} = 0,$$

енергія сигналу похибки квантування

$$M((\varepsilon(n))^2) = \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} x^2 \cdot p_{\varepsilon}(x) dx = \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} \frac{x^2}{\Delta} dx = \frac{x^3}{3\Delta} \Big|_{-\Delta/2}^{\Delta/2} = \frac{\Delta^2}{12}$$

аналогічно дисперсія рівна

$$\sigma^2 = M[\varepsilon(n) - a]^2 = M(\varepsilon^2(n)) = \frac{\Delta^2}{12}.$$

де  $M$  - оператор отримання математичного сподівання.

При квантуванні методом зрізування у  $k$ -розрядного числа  $x(n)$  відкидаються  $k - b$  молодших розрядів і у результаті отримують квантоване  $b$ -розрядне число  $y(n)$ . За такого методу шум квантування  $\varepsilon(n)$  теж має рівномірний розподіл, але на інтервалі  $[-Q, 0]$ . Тоді для математичного сподівання шуму  $\varepsilon(n)$  маємо

$$M(\varepsilon(n)) = -\Delta/2,$$

а дисперсія рівна

$$\sigma^2 = M[\varepsilon(n) - a]^2 = M\left[\varepsilon(n) + \frac{\Delta}{2}\right]^2 = \frac{\Delta^2}{12}.$$

#### **Відношення сигнал/шум**

Важливою інформацією про властивості АЦП є відношення між потужностями сигналу та шуму. Воно називається відношенням сигнал/шум (англ. signal-to-noise ratio, скорочено *SNR*) — це безрозмірна величина, що рівна відношенню потужності корисного сигналу до потужності шуму.

$$\text{SNR} = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}}$$

де  $P_c$  – потужність сигналу,  $P_{\text{ш}}$  – потужність шуму. Так як така величина у типових випадках вимірюється десятками тисяч, то для зручності величину відношення сигнал шум вимірюють у децибелах (дБ), а формула набуває вигляд:

$$\text{SNR} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right) = 10 \cdot \log_{10}(P_c) - 10 \cdot \log_{10}(P_{\text{ш}})$$

Чим більше величина відношення тим краще якість системи. Сучасна високоякісна аудіо апаратура має показник сигнал/шум на рівні 100—120 дБ, для відтворення музики бажано, щоб цей показник був не менше 75 дБ, для розбірливості мовлення необхідно, щоб SNR було не менше 30 дБ. У відеотехніці значення SNR від 45 до 60 дБ відповідають достатній якості відеосигналу, значення менше 40 дБ означає високий рівень шумів і як наслідок низьку якість відеосигналів.

Визначимо відношення сигнал/шум для шуму квантування.

Припустимо, що корисний сигнал відповідає  $1/\sqrt{2}$  максимального значення шкали АЦП. Тоді амплітуда сигналу дорівнює

$$A_c = \frac{2^b \Delta}{\sqrt{2}}, \text{ а потужність сигналу рівна: } P_c = 2^{2b-1} \Delta^2, \text{ де } b \text{ – число розрядів коду.}$$

Отже відношення сигнал/шум у такому випадку визначається за формулою:

$$\text{SNR} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{2^{2b-1} \cdot \Delta^2}{\Delta^2 / 12} \right) = 10 \cdot \log_{10}(2^{2b} \cdot 6)$$

$$\text{SNR} = 6.02 b + 7.78 \text{ (дБ)}$$

Якщо ж припустити, що корисний сигнал синусоїдальний, а його значення кодується як число із знаком, тоді максимальне значення амплітуди буде визначатись як:

$$A_c = 2^{b-1} \Delta,$$

а миттєве значення сигналу буде дорівнювати:

$$S(t) = 2^{b-1} \cdot \Delta \cdot \sin(\omega t + \varphi).$$

$$\text{Його потужність тоді рівна } P(t) = (2^{b-1} \cdot \Delta \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi))^2.$$

Середнє значення потужності за період  $T = 2 \cdot \pi / \omega$ :

$$P_c = \frac{1}{T} \int_0^T (2^{b-1} \cdot \Delta \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi))^2 dt = \frac{2^{2b-2} \cdot \Delta^2}{2 \cdot T} \int_0^T (1 - \cos(2\omega \cdot t + 2\varphi)) dt = 2^{2b-3} \cdot \Delta^2$$

Отже відношення сигнал/шум у такому випадку визначається за формулою:

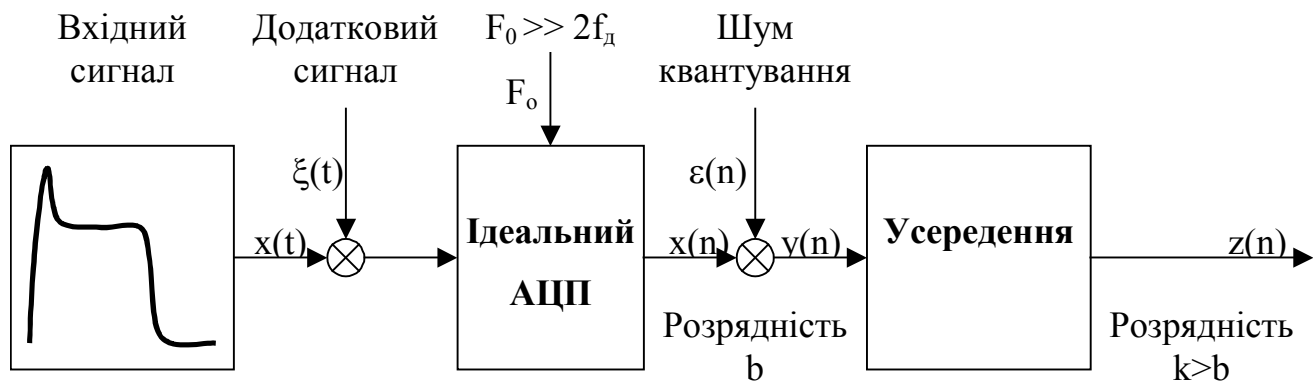
$$\text{SNR} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{2^{2b-3} \cdot \Delta^2}{\frac{\Delta^2}{12}} \right) = 10 \cdot \log_{10}(2^{2b-1} \cdot 3) = 10 \cdot \log_{10} \left( 2^{2b} \cdot \frac{3}{2} \right)$$

$$\text{SNR} = 20 \cdot \log_{10}(2) \cdot b + 10 \cdot \log_{10}(1.5) = 6.02 b + 1.76 \text{ (дБ)}$$

### **Збільшення роздільної здатності АЦП за допомогою передискретизації**

Досить часто необхідно отримати більшу роздільну здатність ніж забезпечує наявний АЦП. Це можна здійснити за допомогою передискретизації даних.

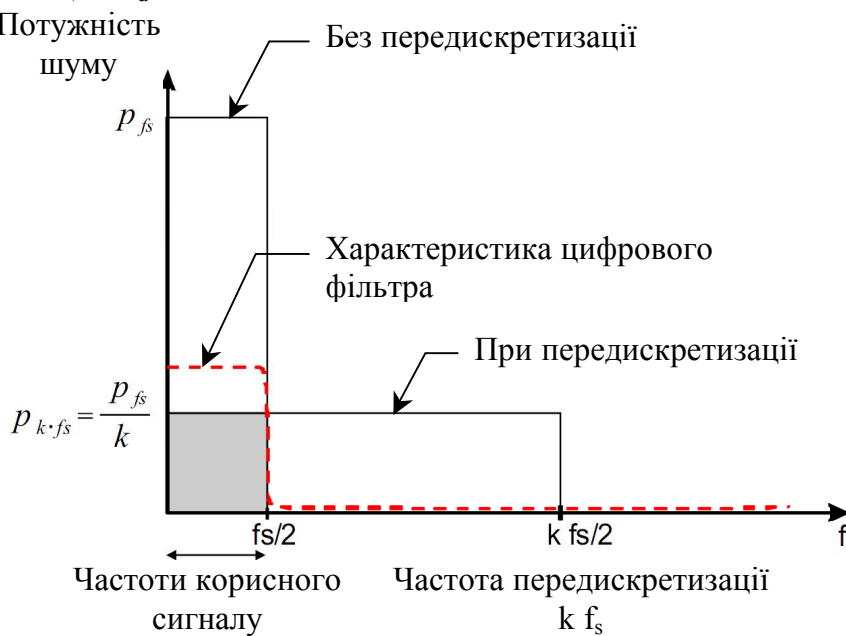
Основна ідея методу полягає у додаванні до сигналу спеціального додаткового сигналу малої амплітуди, дискретизації сигналу із високою частотою (так званої передискретизації) і подальшого усереднення результатів. При дотриманні деяких умов передискретизація і усереднення можуть знизити шум і підняти відношення сигнал/шум. Це збільшить ефективну кількість біт в результатах вимірювань. Подібна система показана на рис.7, і вона може бути реалізована як на вбудованих в процесор АЦП, так і на зовнішніх.



**Рис. 7. Структура системи для збільшення розрядності АЦП  
Додавання білого шуму**

Першим із можливих додаткових сигналів є сигнал додаткового білого шуму. Проте, можна довести, що для ідеального АЦП та вхідного сигналу з відсутністю або низькою зміною амплітуди помилка квантування не може бути описана як джерело білого шуму. Тому на вхід АЦП повинен додаватись спеціальний додатковий сигнал. На практиці це може бути забезпечено шляхом подання додаткового сигналу помилки із нормальним розподілом миттєвого значення і дисперсією  $\Delta$ .

На рисунку нижче показано ефективне зменшення потужності шуму у частотному діапазоні, що становить інтерес, за допомогою передискретизації із фактором  $k$  і результуючою частотою дискретизації  $k f_d$



**Рис. 8. Розподіл потужності похибки дискретизації**

Із рисунка видно, що збільшення частоти дискретизації "розмазує" енергію похибки на більший частотний діапазон. Потім непотрібна частина частотного діапазону може бути за допомогою цифрового фільтра відкинута і потужність похибки дискретизації буде зменшена у  $k$  разів. Найпростішим фільтром, що здійснює таку операцію є фільтр, що здійснює усереднення за  $k$  періодів.

Отже потужність шуму квантування, що залишився, визначається за формулою

$$P_{ш} = \frac{\Delta^2}{12 \cdot k}$$

Тому відношення сигнал шум може бути записано у вигляді

$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_c}{P_{ш}} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{2^{2b-1} \cdot \Delta^2}{\Delta^2 / (12k)} \right) = 10 \cdot \log_{10} (2^{2b} \cdot 6 \cdot k) = 20 \cdot b \cdot \log_{10} (2) + 10 \cdot \log_{10} (6k)$$

Якщо усереднюється  $k = 2^m$  вибірок то відношення сигнал/шум визначається за формулою:



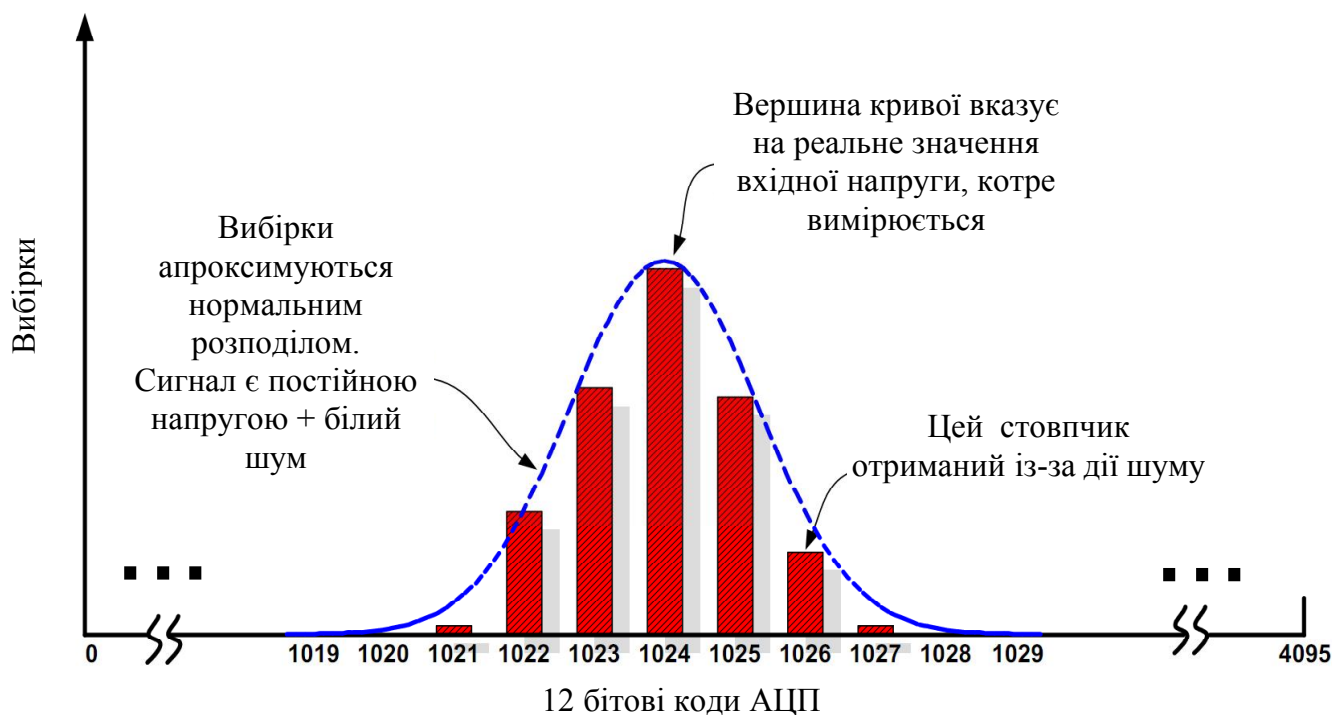
$$\text{SNR} = 20 \cdot b \cdot \log_{10}(2) + 10 \cdot \log_{10}(6 \cdot 2^m) = 20 \cdot \left( b + \frac{m}{2} \right) \cdot \log_{10}(2) + 10 \cdot \log_{10}(6)$$

Отже усереднення  $2^m$  вибірок у такому варіанті дає таке ж відношення сигнал/шум як і додавання  $m/2$  розрядів до АЦП, якщо на вхід поступає додатковий шумовий сигнал. Зрозуміло, що вхідний сигнал шуму має мати нульове значення математичного сподівання.

### Вимоги до шумового сигналу у системі

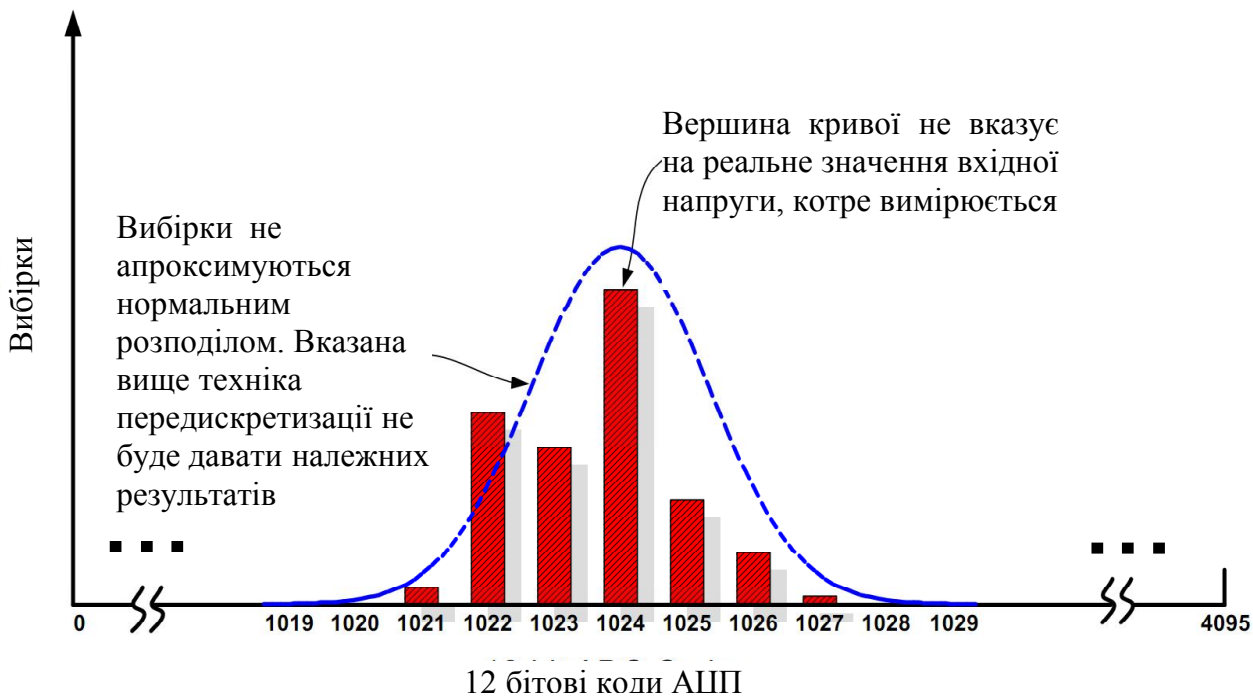
Якщо загальний шум не стаціонарний (наприклад, який є в системах з певною кореляцією з-за зворотного зв'язку), то передискретизація і усереднення не будуть ефективними. Крім того, якщо шум квантування більший ніж шумовий сигнал, то передискретизація і усереднення можуть бути не ефективні. Така ситуація типова, коли використовуються АЦП з малою кількістю розрядів (наприклад, 8-бітні). У такому випадку шум у сигналі не має достатньої амплітуди, щоб вхідний сигнал зміг переключити розряд АЦП. Тоді у систему спеціально інжектуються шум у сигнал. Така операція часто називається дизерингом (dithering).

Більшість застосувань, які вимірюють сигнал з використанням АЦП, отримують вигравш від передискретизації і усереднення. Для практичного визначення характеристик шуму у сенсі чи підходить він для передискретизації і усереднення використовується аналіз вхідних даних АЦП за гистограмою, котра показує, скільки вибірок, отриманих від АЦП, відповідає кожному із значень коду. Якщо вхідний сигнал є постійною напругою, то гистограма апроксимується нормальною функцією розподілу.



**Рис. 9. Гістограма вхідного сигналу із шумом, що може бути використаний для збільшення розрядності АЦП**

При наявності недостатнього шуму, всі вибірки потраплять в одну позицію. Якщо ж шум має кореляцію із сигналом, або функція передачі АЦП нелінійна, то гистограма не буде подібна на нормальний розподіл (див. наступний рисунок). У такому разі передискретизація і усереднення не дадуть результату.



**Рис. 10. Гістограма вхідного сигналу із шумом, що може бути використаний для збільшення розрядності АЦП**

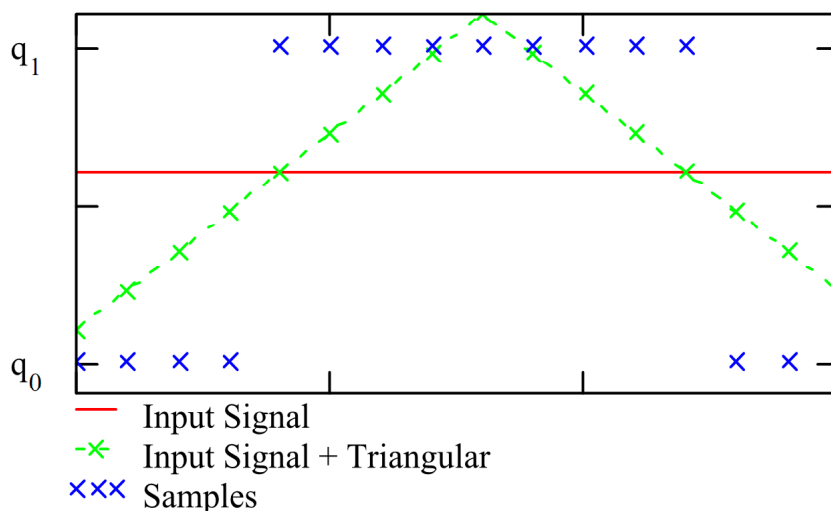
**Збільшення розрядності АЦП розгорткою трикутним сигналом**

Інший підхід для підвищення роздільної здатності АЦП використовує додавання до вхідного сигналу деякого трикутного сигналу (рис. 7).

Нехай вхідний сигнал має значення  $Q_0$  і це значення знаходиться між сусідніми значеннями кодів АЦП  $q_1$  та  $q_0$ . Якщо до вхідного сигналу додати трикутний сигнал із невеликою амплітудою і нульовим середнім значенням то кількості вибірок  $x_1$  та  $x_0$ , що відповідають кодам  $q_1$  та  $q_0$  будуть пропорційні відстаням від реального значення вхідної напруги до значень номіналів  $q_1$  та  $q_0$ .

Для того, щоб отримати найкращі результати трикутний сигнал повинен мати амплітуду  $(n + 0.5) \Delta$ , де  $n = 0, 1, 2, \dots$

При високій частоті вимірювань і низькій максимальній частоті вхідного сигналу зміну вхідного сигналу можна розглядати як невелику. Наступний рисунок відображає вхідний сигнал із рівнем  $0.6 \Delta$ . Типовий АЦП перетворить цей сигнал у сигнал із кодом рівним 1. При додаванні трикутного сигналу з частотою рівною  $f_s/16$  за час вимірювань буде отримано 16 значень з послідовно розподіленими 0 чи 1. Співвідношення між кількістю входжень 0 і 1 представляє фактичне значення сигналу із точністю  $1/16$  (рис. 11).



**Рис. 11. Збільшення точності АЦП шляхом додавання трикутного сигналу малої амплітуди**

У загальному при додаванні трикутного сигналу із частотою  $f_s/2^m$  значення вихідного

сигналу визначається за формулою:

$$\bar{q} = \frac{1}{2^m} \sum_{i=1}^{2^m} q_i$$

Де  $2^m$  - кількість вибірок  $q_i$  вхідного сигналу, що усереднюються ( $m > 1$ ).

При цьому крок квантування стає рівним

$$\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{2^{N-1}}$$

На рисунку, використовується коефіцієнт передискретизації 16 ( $m = 4$ ).

У процесі роботи АЦП було отримано 7 разів  $q_0$  і дев'ять  $q_1$ . Тому значення вхідного сигналу рівне

$$x = \frac{7 \cdot q_0 + 9 \cdot q_1}{16} = q_0 + \frac{9}{16} \Delta.$$

Можна показати, що відношення сигнал/шум для такого варіанта визначається за формулою:

$$\text{SNR} = 20 \cdot (b + m - 1) \cdot \log_{10}(2) + 10 \cdot \log_{10}(6)$$

Отже усереднення  $2^m$  вибірок у такому варіанті дає таке ж відношення сигнал/шум як і додавання  $m-1$  розрядів до АЦП.

### **Завдання до лабораторної роботи**

1. Дослідити статистичні властивості шуму квантування (побудувати гістограму, знайти оцінки середнього, дисперсії, коефіцієнта кореляції) для АЦП, у якому квантування чисел здійснюється способом округлювання.

2. Дослідити статистичні властивості шуму квантування (побудувати гістограму, знайти оцінки середнього, дисперсії, коефіцієнта кореляції) для АЦП, у якому квантування чисел здійснюється способом зрізування.

### **Порядок виконання роботи**

Для виконання роботи необхідно запустити програмне середовище Mathcad та виконати наступні пункти роботи.

1. Отримати реалізацію випадкового дискретного процесу шляхом генерації рівномірно розподілених чисел за допомогою функції rand. Зобразити реалізацію графічно.

2. Обчислити оцінки математичного сподівання, дисперсії та побудувати гістограму отриманої в п. 1 реалізації.

3. За допомогою функції quantize на основі отриманої в п. 1 реалізації дискретного випадкового процесу побудувати реалізацію квантованої послідовності з використанням методу округлювання чисел. Зобразити отриману квантовану послідовність графічно.

4. На основі побудованої в п. 3 реалізації квантованої послідовності з використанням методу округлювання чисел знайти оцінки математичного сподівання, дисперсії, коефіцієнта кореляції та побудувати гістограму. Отримані оцінки порівняти з оцінками в п. 2.

5. Порівняти дискретну послідовність, отриману в п. 1, з квантованою послідовністю із п. 3 на основі наступного критерію

$$\|y - x\| = \sqrt{\sum_{i=1}^K |y_i - x_i|^2},$$

де  $K$  - кількість елементів (відліків) у послідовності.

6. За допомогою функції quantize на основі отриманої в п. 1 реалізації дискретного випадкового процесу побудувати реалізацію квантованої послідовності з використанням методу зрізування чисел. Зобразити отриману квантовану послідовність графічно та виконати дослідження, аналогічні пп. 4, 5.

7. Спробувати реалізувати передискретизацію із коефіцієнтом  $2^4$  і визначити похибку квантування.

8. Проаналізувати отримані результати за пп. 1 – 7 і зробити висновки.

### Контрольні питання

1. Чим викликана необхідність виконувати квантування відліків дискретного сигналу ?
2. Що є причиною виникнення шумів квантування ?
3. Що таке крок квантування і як він визначається ?
4. Дайте означення нелінійної моделі процесу квантування.
5. Сформулюйте поняття лінійної моделі процесу квантування.
6. У чому полягає спосіб округлювання при квантуванні відліків дискретного сигналу ?
7. У чому полягає спосіб зрізування при квантуванні відліків дискретного сигналу ?
8. Яким розподілом описуються шуми квантування при використанні округлення в АЦП?
9. Яким розподілом описуються шуми квантування при використанні способу зрізування ?
10. Від чого залежить величини дисперсія шуму квантування ?
11. Запишіть вирази для математичних сподівань шумів квантування при використанні способу округлювання і способу зрізування чисел.

### Література

1. Oversampling Techniques using the TMS320C24x Family Literature Number: SPRA461 Texas Instruments Europe June 1998.
2. Improving ADC resolution by oversampling and averaging. Application note AN118. Silicon Labs [pdf] <http://www.cypress.com/file/236481/download>
3. Гольденберг Л.М. и др. Цифровая обработка сигналов: Учебное пособие для вузов. - М.: Радио и связь, 1990.- 256 с.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Пер. с англ. - М.: Техносфера, 2006. - 1072 с.
5. Дьяконов В., Абраменкова И. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. - СПб.: Питер, 2002, 608 с.
6. Оппенгейм А.В., Шафер Р.В. Цифровая обработка сигналов. - М.: Связь, 1979. - 416 с.
7. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. - М.: Мир, 1978. - 848 с.
8. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. - СПб.: Питер, 2003. - 604 с.: ил.
9. Сиберт У.М. Цепи, сигналы, системы. - М.: Мир, 1988. - 336 с.
10. Солонина А.И., Улахович Д.А., Арбузов С.М., Соловьева Е.Б. Основы цифровой обработки сигналов: Курс лекций. Изд. 2-е испр. И перераб.- СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
11. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. - М.: Мир, 1989. - 448 с.
12. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. - М.: Мир, 1988. - 488 с.
13. Купер Дж., Макгиллем А. Вероятностные методы анали за сигналов и систем. - М.: Мир, 1989. - 376 с.
14. Марпл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. - М.: Мир, 1990. - 584 с.
15. Претт Е. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. под ред. Д. С. Лебедева, - М.: Мир, 1982. - в 2-х книгах.

## Зміст

Тема роботи .....	3
Мета роботи.....	3
Теоретичні відомості .....	3
Аналоговий сигнал.....	3
Дискретний сигнал.....	3
Квантований сигнал.....	4
Цифровий сигнал .....	5
Квантування сигналу .....	5
Відношення сигнал/шум.....	6
Збільшення роздільної здатності АЦП за допомогою передискретизації.....	7
Додавання білого шуму .....	8
Вимоги до шумового сигналу у системі .....	9
Збільшення розрядності АЦП розгорткою трикутним сигналом .....	10
Завдання до лабораторної роботи.....	11
Порядок виконання роботи .....	11
Контрольні питання.....	12
Література .....	12
Зміст .....	13