

Лекція №2

Квантування за рівнем

Розділ 2.1. Модель дії аналогово-цифрового перетворювача (АЦП)

Для зручності теоретичних викладок доцільно представити модель дії АЦП у вигляді взаємодії двох послідовно з'єднаних елементів: імпульсного елемента та квантувача за рівнем (див. рис. 2.1).

Дія цих елементів полягає в наступному:

1. Імпульсний елемент (ІЕ) із складу АЦП перетворює неперервний за часом та рівнем сигнал $x(t)$, що діє на його вході, у квантований за часом та неперервний за рівнем сигнал $x(n)$ на його виході. Тобто фіксує значення вхідного сигналу АЦП в моменти часу $t = nT_0$, $n = 0, 1, 2, \dots$.

2. Квантувач за рівнем (КР) із складу АЦП перетворює квантований за часом та неперервний за рівнем сигнал $x(n)$, що діє на його вході, у вхідний (квантований за часом та рівнем) цифровий сигнал $x_c(n)$ на його виході.

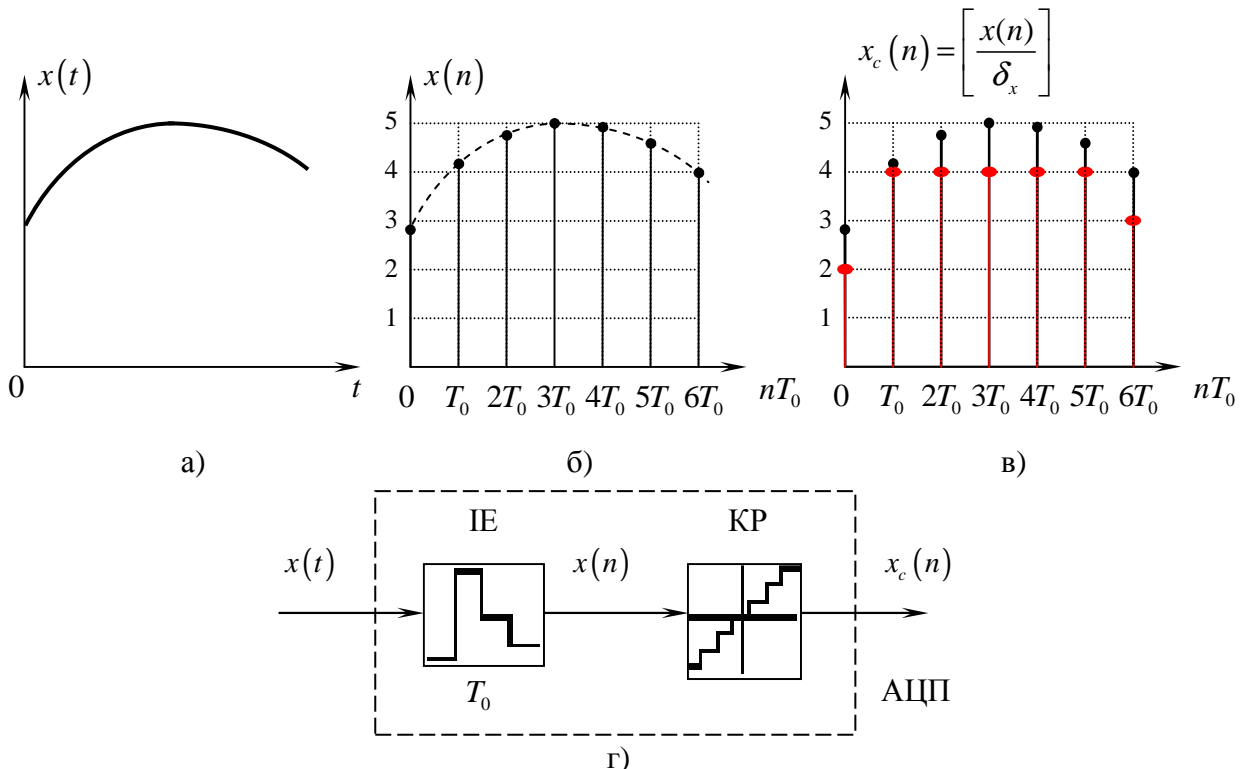


Рис. 2.1 Модель дії аналогово-цифрового перетворювача:
а), б), в) – графічні образи сигналів, що діють у схемі г);
 δ_x – крок квантування за рівнем; T_0 – крок квантування за часом;

$x(n)$ – дискретний за часом сигнал, який дорівнює значенню неперервного сигналу $x(t)$ в момент часу $t = nT_0$, $n = 1, 2, \dots$;

[...] – символізує математичну операцію, яка полягає у виділенні цілої частини числа, тобто округленні донизу до найближчого цілого числа

Розділ 2.2. Модель дії цифро-аналогового перетворювача (ЦАП)

Модель дії цифро-аналогового перетворювача зручно представити у вигляді взаємодії трьох послідовно з'єднаних елементів: імпульсного елемента, квантувача за рівнем та екстраполятора (див. рис. 2.2).

Дія цих елементів полягає в наступному:

1. Імпульсний елемент (ІЕ) із складу ЦАП перетворює вхідний цифровий сигнал $e_c(nT_0)$ із кроком квантування за часом T_0 у вихідний цифровий сигнал $e_c^{IE}(i \cdot T_e)$ із кроком квантування за часом $T_e = m \cdot T_0$, де m - ціле додатне число. Тобто або зберігає період квантування за часом незмінним ($m=1$), або його збільшує ($m>1$) і виконує тим самим, так зване, «проріджування» вхідного сигналу.

2. Квантувач за рівнем (КР) із складу ЦАП перетворює вхідний цифровий сигнал $e_c^{IE}(i \cdot T_e)$ із кроком квантування за рівнем δ_e^{IE} у вхідний цифровий сигнал $e_c^{KP}(i \cdot T_e)$ із кроком квантування за рівнем δ_e^{KP} . Тобто виконує математичну дію, що описується формулою $e_c^{KP}(i \cdot T_e) = \left[\frac{e_c^{IE}(i \cdot T_e) \cdot \delta_e^{IE}}{\delta_e^{KP}} \right]$.

Підкреслимо, що при переході від безрозмірної цифрової форми представлення сигналів $e_c^{IE}(i \cdot T_e)$ та $e_c^{KP}(i \cdot T_e)$ до розмірної, необхідно ці сигнали помножити на крок квантування за рівнем відповідно на δ_e^{IE} та δ_e^{KP} . За звичай $\delta_e^{IE} \leq \delta_e^{KP}$.

3. **Екстраполятор (Е) із складу ЦАП** перетворює вхідний цифровий сигнал $e_c^{KP}(i \cdot T_e)$ у вихідний неперервний або кусково-неперервний сигнал $e(t)$.

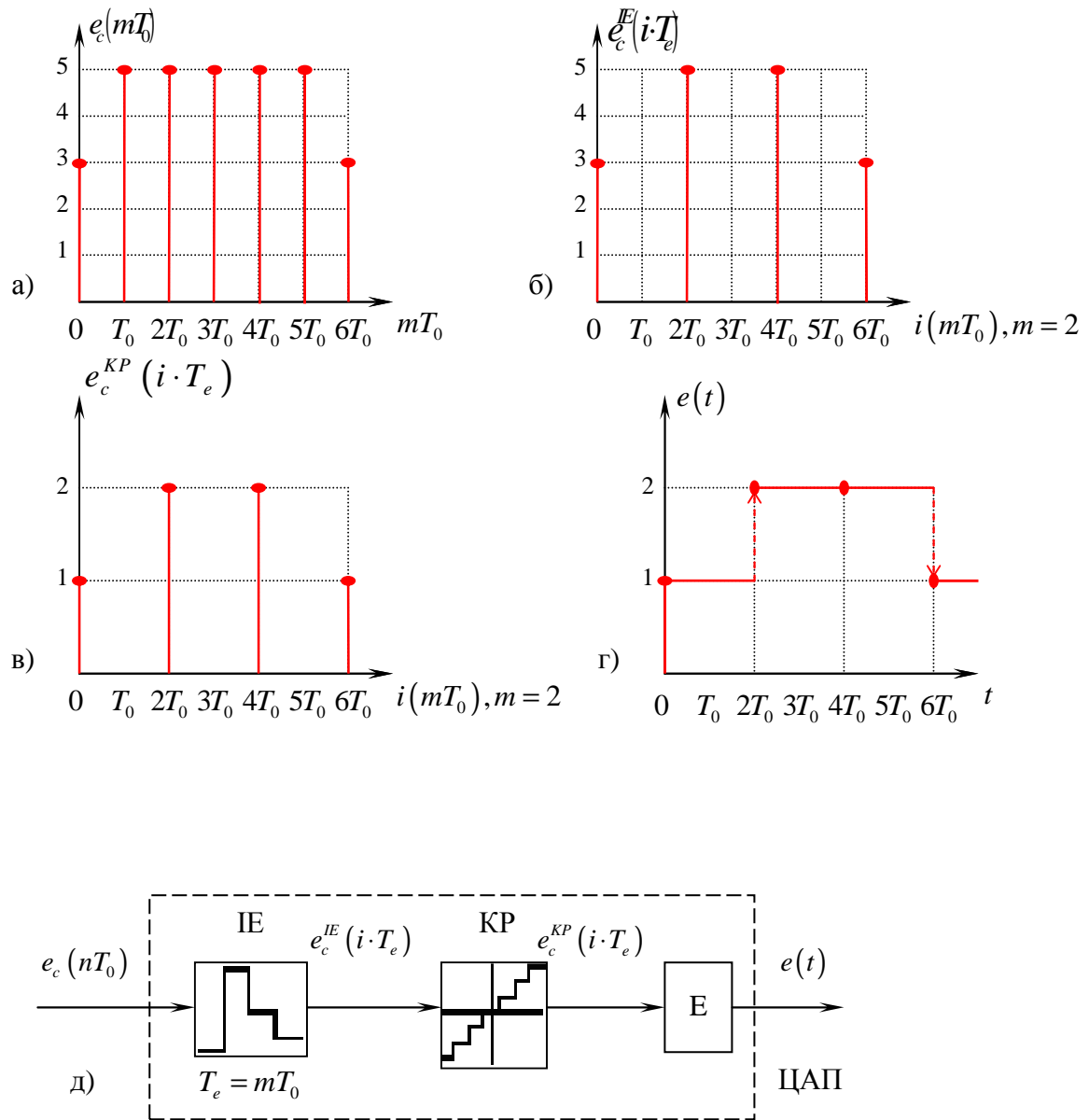


Рис. 2.2 Модель дії цифро-аналогового перетворювача:
а), б), в), г) – графічні образи сигналів, що діють у схемі д); n та m - цілі додатні числа;

На рис.2.2 г) зображена дія так званого екстраполятора нульового порядку (в подальшому будемо його позначати E_0).

Екстраполятор нульового порядку (E_0) передає значення вхідного сигналу на вихід і зберігає це значення незмінним на своєму виході до моменту часу надходження наступного сигналу на його вхід.

Розділ 2.3. Статичні характеристики квантувача за рівнем

Математичний зміст операції квантування за рівнем однаковий як для квантувача за рівнем із вкладу АЦП, так і для квантувача за рівнем із складу ЦАП. Але для квантувача за рівнем із вкладу АЦП статичні характеристики є більш складними. Тому, розглянемо саме ці статичні характеристики. Математична модель дії квантувача за рівнем із вкладу АЦП задається за допомогою виразу:

$$x_c = \left[\frac{x}{\delta_x} + A \right], \text{ де, зазвичай, } A \in \{0; 0.5; 1\}; \text{ як і раніше } [...] - \text{ символізує}$$

математичну операцію, яка полягає у виділенні цілої частини числа, тобто округленні донизу до найближчого цілого числа.

Параметр A математично задає тип квантування:

1) при $A=0$ – відбувається “зрізання”, тобто округлення до низу до найближчого цілого числа по відношенню до числа $\frac{x}{\delta_x}$;

2) при $A=0.5$ – відбувається округлення до найближчого цілого по відношенню до числа $\frac{x}{\delta_x}$;

3) при $A=1$ – відбувається округлення до найближчого цілого числа вгору по відношенню до числа $\frac{x}{\delta_x}$.

Побудуємо статичні характеристики КР: $x_c = \left[\frac{x}{\delta_x} + A \right]$ - залежність вихідного цифрового сигналу x_c від вхідного неперервного сигналу x ; $\Delta x_{kv} = x_c \cdot \delta_x - x$ - залежність помилки квантування Δx_{kv} від вхідного неперервного сигналу x .

Як найбільш цікаві, розглянемо ці характеристики для двох значень параметру: $A=0$ (див. рис.2.3) та $A=0.5$ (див. рис.2.4).

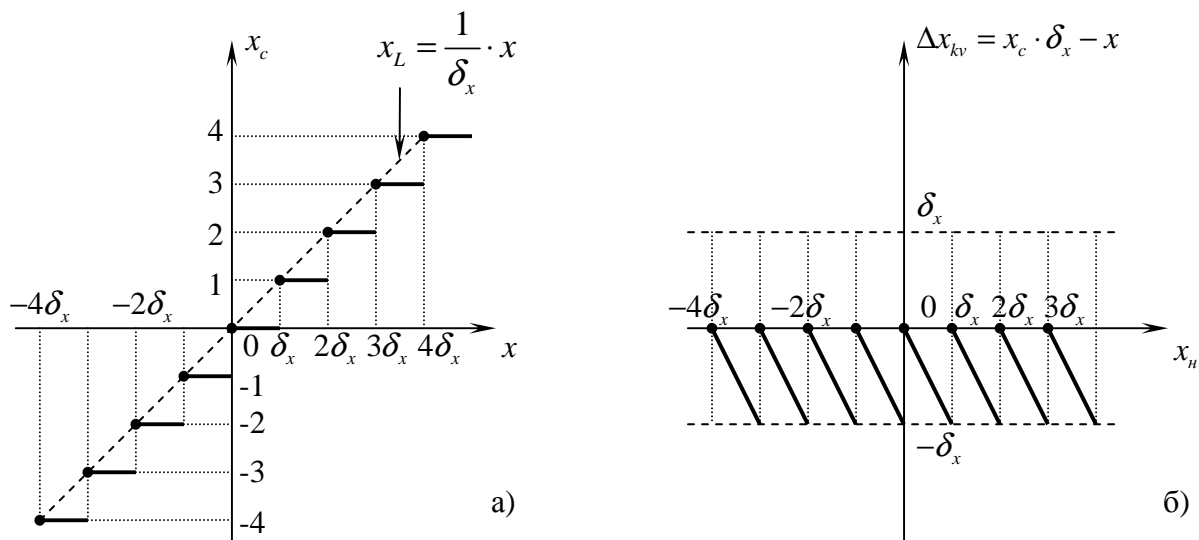


Рис. 2.3. Статичні характеристики квантувача за рівнем із складу АЦП

при умові $A=0$: а) $x_c = \left[\frac{x}{\delta_x} \right]$ - залежність вихідного цифрового сигналу x_c від вхідного неперервного сигналу x ; б) залежність помилки квантування Δx_{kv} від вхідного неперервного сигналу x ; $x_L = \frac{1}{\delta_x} \cdot x$ - лінеаризована статична характеристика; $|\Delta x_{kv}|_{\max} = \delta_x$

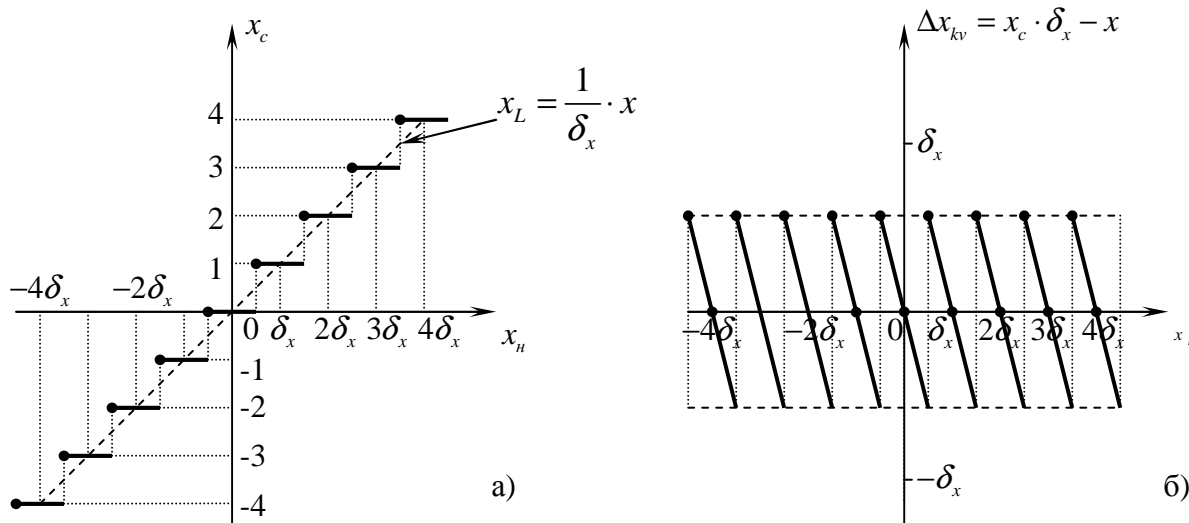


Рис. 2.4. Статичні характеристики квантувача за рівнем із складу АЦП

при умові $A=0.5$: а) $x_c = \left[\frac{x}{\delta_x} + 0.5 \right]$ - залежність вихідного цифрового сигналу x_c від вхідного неперервного сигналу x ; б) залежність помилки квантування Δx_{kv} від

вхідного неперервного сигналу x ; $x_L = \frac{1}{\delta_x} \cdot x$ – лінеарізована статична

$$\text{характеристика; } |\Delta x_{kv}|_{\max} = \frac{\delta_x}{2}$$

Підкреслимо, що при $A=1$ статичні характеристики квантувача за рівнем за якісним характером повністю відповідатимуть характеристикам, що розглянуті вище: залежність вихідного цифрового сигналу x_c від вхідного неперервного сигналу має вигляд сходинок, що йдуть на підйом, і розташовані зверху над лінеарізованою статичною характеристикою $x_L = \frac{1}{\delta_x} \cdot x$, а залежність помилки квантування Δx_{kv} від вхідного неперервного сигналу має періодичний пилуватий характер із межами зміни від 0 до δ_x . При $A=1$, так само як і при $A=0$, $|\Delta x_{kv}|_{\max} = \delta_x$.

Розділ 2.4. Обчислення кількості двійкових розрядів квантувача за рівнем

Якщо відомо тип квантування за рівнем, тобто відомо параметр A , та обмеження на максимальну величину помилки квантування B , то можливо оцінити величину кроку квантування за рівнем:

$\delta_x = |\Delta x_{kv}|_{\max, A=0} \leq B$, $\delta_x = |\Delta x_{kv}|_{\max, A=1} \leq B$, $\frac{\delta_x}{2} = |\Delta x_{kv}|_{\max, A=\frac{1}{2}} \leq B$. Як бачимо, при $A=0$ та $A=1$, можливо обрати $\delta_x = B$, а при $A=0.5$ значення кроку квантування за рівнем можна збільшити у двічі $\delta_x = 2B$.

Знання величини кроку квантування за рівнем дозволяє обчислити кількість двійкових розрядів квантувача за рівнем.

Так, наприклад, якщо необхідно виміряти кут обертання навколо якої-небудь вісі з точністю $|\Delta x_{kv}|_{\max} \leq B = 10''$ в діапазоні кутів $\pm 180^\circ$, то одиниця молодшого розряду може бути обрана за умови $\delta_x = 2B$ ($A=0.5$), тобто $\delta_x = 20''$.

Тоді, кількість двійкових розрядів КР із складу АЦП обраховується на основі наступних міркувань. Припустимо, що максимальна кількість відмінних від нуля рівнів однієї гілки статичної характеристики КР дорівнює "k", а максимальне значення вхідного сигналу квантувача за рівнем x_{\max} перетворюється цим квантувачем у вихідний цифровий сигнал $x_{c\max}$. Знаючи x_{\max} , δ_x , A можемо обчислити "k":

$$\underbrace{111\dots1}_{\substack{\kappa \\ x_{c\max}}} = \underbrace{1 \cdot 2^{\kappa-1} + 1 \cdot 2^{\kappa-2} + \dots + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0}_{\substack{x_{c\max} \\ \text{(арифметична прогресія } b=1, q=2)}} = \left[\frac{x_{\max}}{\delta_x} + A \right] \approx \frac{x_{\max}}{\delta_x} + A \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1(1-2^\kappa)}{1-2} \cong \frac{x_{\max}}{\delta_x} + A \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2^\kappa \cong \frac{x_{\max}}{\delta_x} + A + 1 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \kappa \cong \log_2 \left(\frac{x_{\max}}{\delta_x} + A + 1 \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow A = \frac{1}{2}, \delta_x = 20", \kappa \geq \log_2 \left(\frac{180 \cdot 60 \cdot 60}{20} + \frac{1}{2} + 1 \right) \cong 14.48 \approx 15.$$

З урахуванням знакового розряду потрібно взяти $k = 15 + 1 = 16$ двійкових розрядів.

Аналогічно виконується розрахунок кількості двійкових розрядів для КР із складу ЦАП.

$$\text{Зазвичай } k_{\text{АЦП}} > k_{\text{ЦАП}} : k_{\text{АЦП}} \approx 15 \div 20, k_{\text{ЦАП}} \approx 10 \div 14.$$

Дія квантувача за рівнем у складі АЦП та ЦАП призводить до виникнення відповідних помилок квантування Δx_{kv} та Δe_{kv} , які доцільно інтерпретувати (розглядати) як збурення, що діє в цифровій системі. Тоді, саму цифрову систему можливо розглядати як імпульсну систему (систему, в якій діє лише квантування

за часом), яка перебуває під дією збурень, викликаних квантуванням за рівнем (див. рис. 2.5).

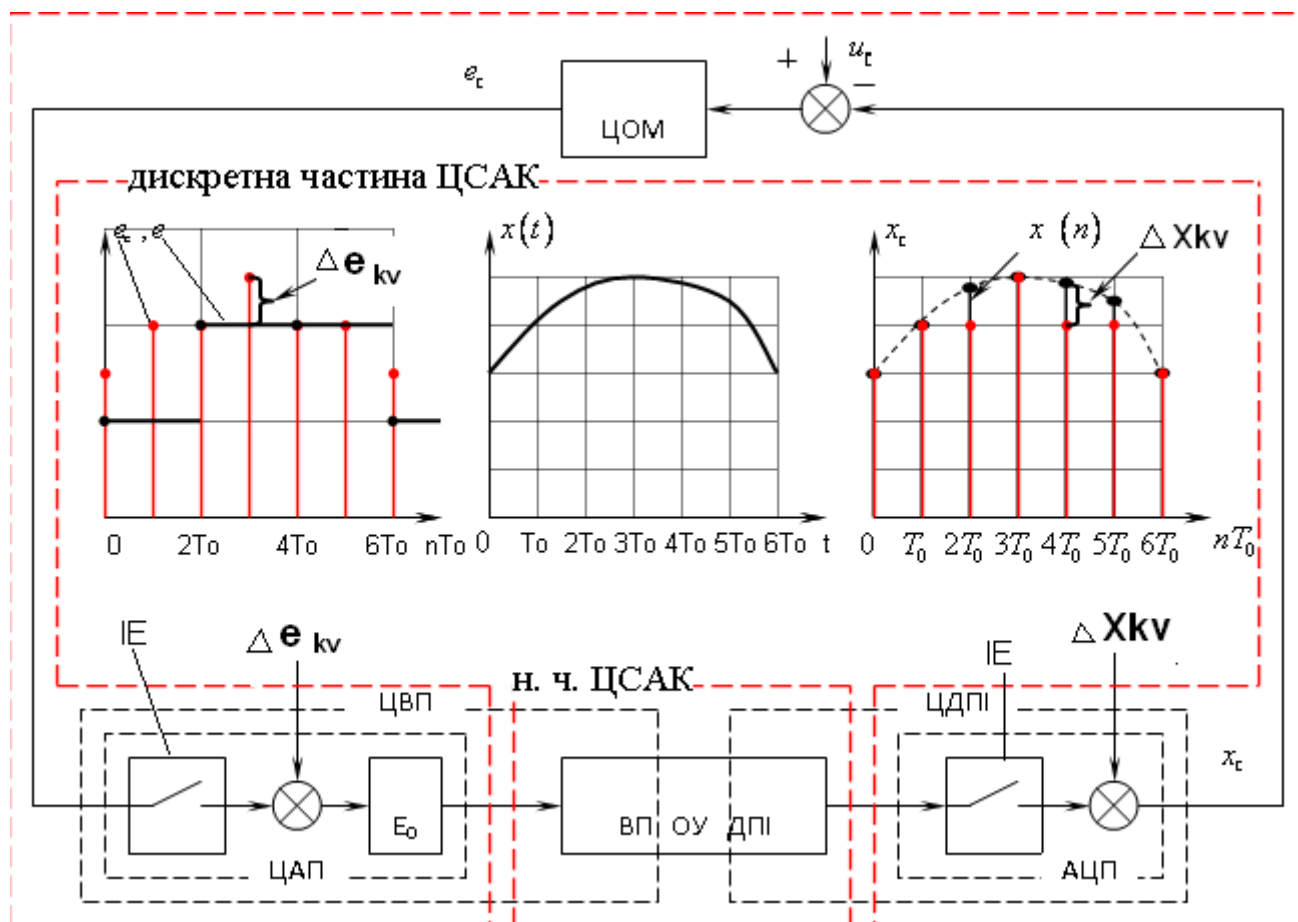


Рис. 2.5 Модель структури окремого каналу ЦСАК як каналу імпульсної системи: Δx_{kv} , Δe_{kv} – збурення, викликані дією квантувача за рівнем; ІЕ – імпульсний елемент, який фіксує значення відповідних сигналів у дискретні моменти часу; $e(t)$, $x(t)$ – неперервні за рівнем та часом сигнали відповідно на вході та виході ОУ; $e_c(n)$ – цифровий сигнал на виході ІЕ, що входить до складу ЦАП; $x_c(n)$ – цифровий сигнал на виході ЦДПІ

На рис.2.5 позначено: н.ч. ЦСАК – неперервна частина окремого каналу ЦСАК, яка включає в себе неперервний ОУ; неперервну частину ЦВП; неперервну частину ЦДПІ. Все інше входить до дискретної (цифрової) частини ЦСАК.

Розділ 2.5. Математична модель помилки квантування за рівнем

З теоретичної точки зору збурення $\Delta x_{kv}(n)$, $\Delta e_{kv}(n)$, які викликані дією КР, розглядаються як додатковий періодичний процес при умові, що вхідний сигнал КР детермінований, або як стохастичний (випадковий) некорельований

процес, рівномірно розподілений в кожний момент дискретного часу «n»(див. рис. 2.6).

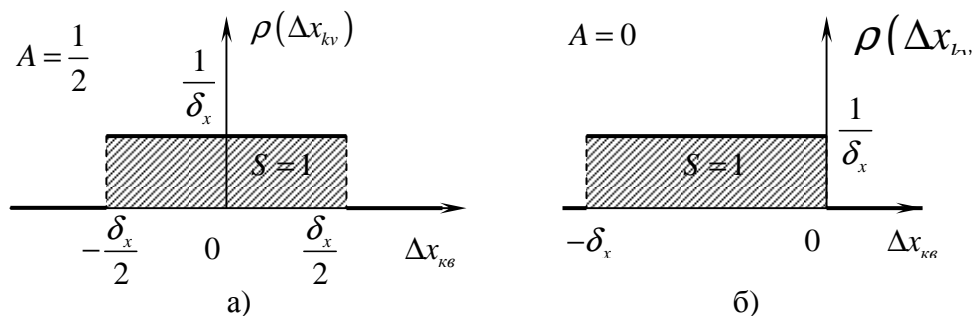


Рис. 2.6. Приклад графіків щільності ймовірності помилки квантування за рівнем $\rho(\Delta x_{kv})$ при округленні ($A=0.5$, а)) та зрізанні ($A=0$, б)) для КР із складу АЦП

Із курсу «Теорія ймовірностей» відомо, що для випадкової величини рівномірно розподіленої в інтервалі $[a,b]$, щільність ймовірності у цьому інтервалі дорівнює $1/(b-a)$, математичне сподівання та дисперсію можливо обчислити за формулами відповідно $m = (a+b)/2$ та $D = (b-a)^2 / 12$. Враховуючи різні значення нижньої та верхньої границь інтервалу $[a,b]$ для різних значень параметра A квантувача за рівнем із складу АЦП (рис.2.6), можемо обчислити значення щільності ймовірності та елементарні статистичні характеристики для випадкової величини $\Delta x_{kv}(n)$:

1) якщо $A=0$, то

$$m_{\Delta x_{kv}} = (-\delta_x + 0) / 2 = -\delta_x / 2,$$

$$D_{\Delta x_{kv}} = (b-a)^2 / 12 = (0 - (-\delta_x))^2 / 12 = \delta_x^2 / 12;$$

2) якщо $A=0.5$, то

$$m_{\Delta x_{kv}} = (-\delta_x / 2 + \delta_x / 2) / 2 = 0,$$

$$D_{\Delta x_{kv}} = (b-a)^2 / 12 = (\delta_x / 2 - (-\delta_x / 2))^2 / 12 = \delta_x^2 / 12;$$

3) якщо $A=1$, то

$$m_{\Delta x_{kv}} = (0 + \delta_x) / 2 = \delta_x / 2,$$

$$D_{\Delta x_{kv}} = (b - a)^2 / 12 = (\delta_x - 0)^2 / 12 = \delta_x^2 / 12.$$

Припустимо $\delta_x = 1$. Тоді: $m_x = -0.5$ при $A=0$; $m_x = 0$ при $A=0.5$;

$m_x = 0.5$ при $A=1$ та $D_x = 1/12 = 0.0833$ для всіх $A=0;0.5;1$.

Розділ 2.6. Імітаційний комп'ютерний експеримент

Комп'ютерна (MATLAB+Simulink) математична модель дії КР із складу АЦП представлена на рис. 2.7.

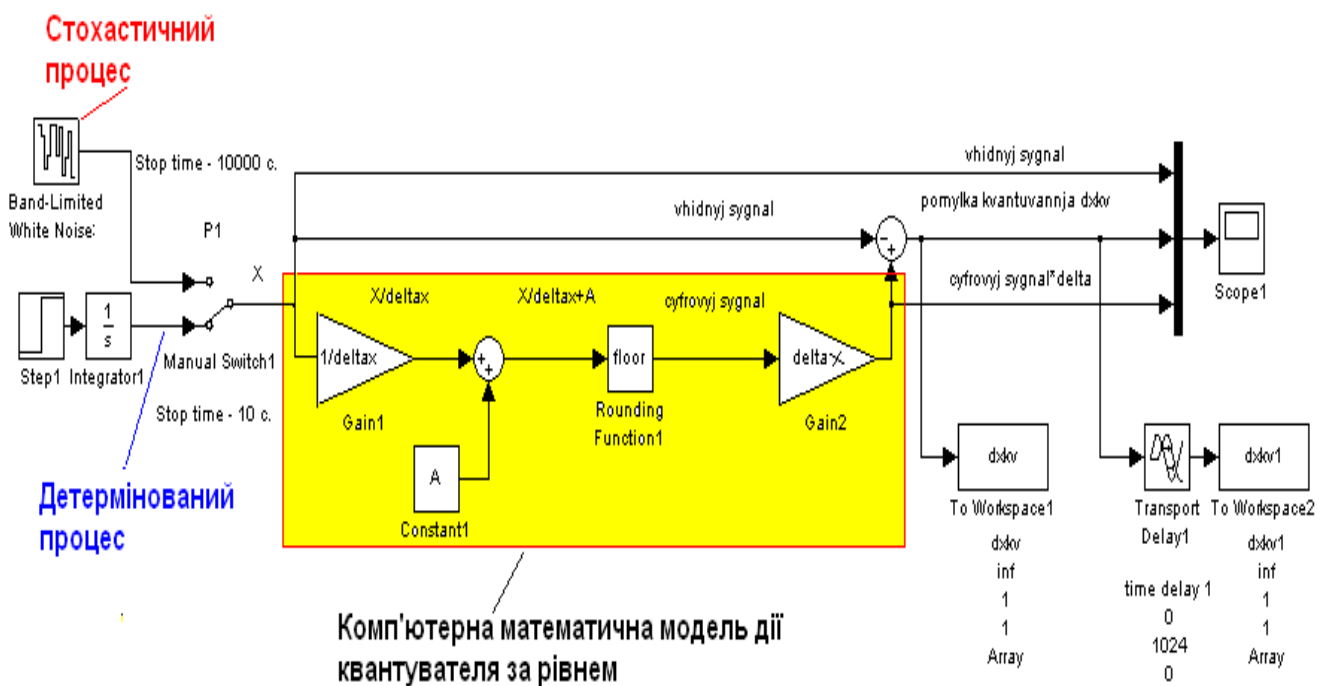
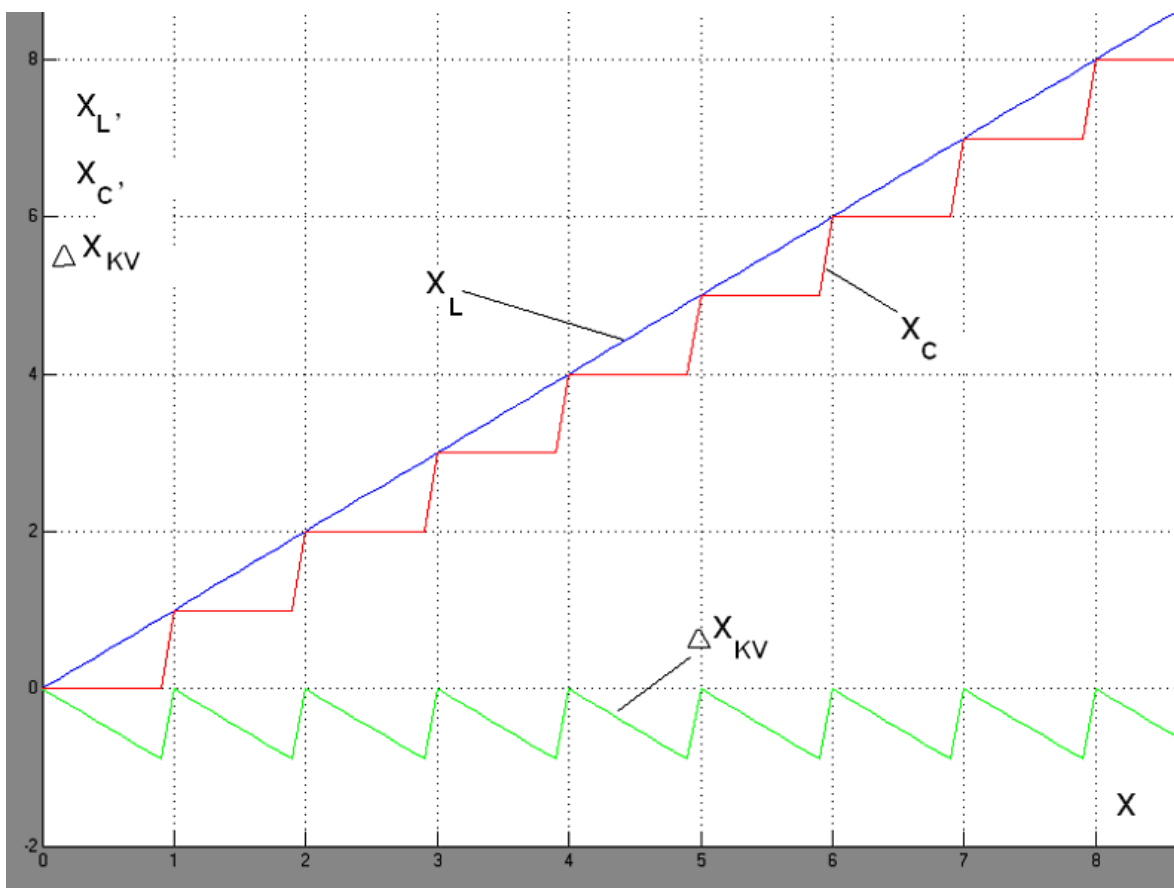


Рис.2.7. Структура імітаційної математичної моделі дослідження процесу функціонування квантувача за рівнем із складу АЦП, побудованої із використанням системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink

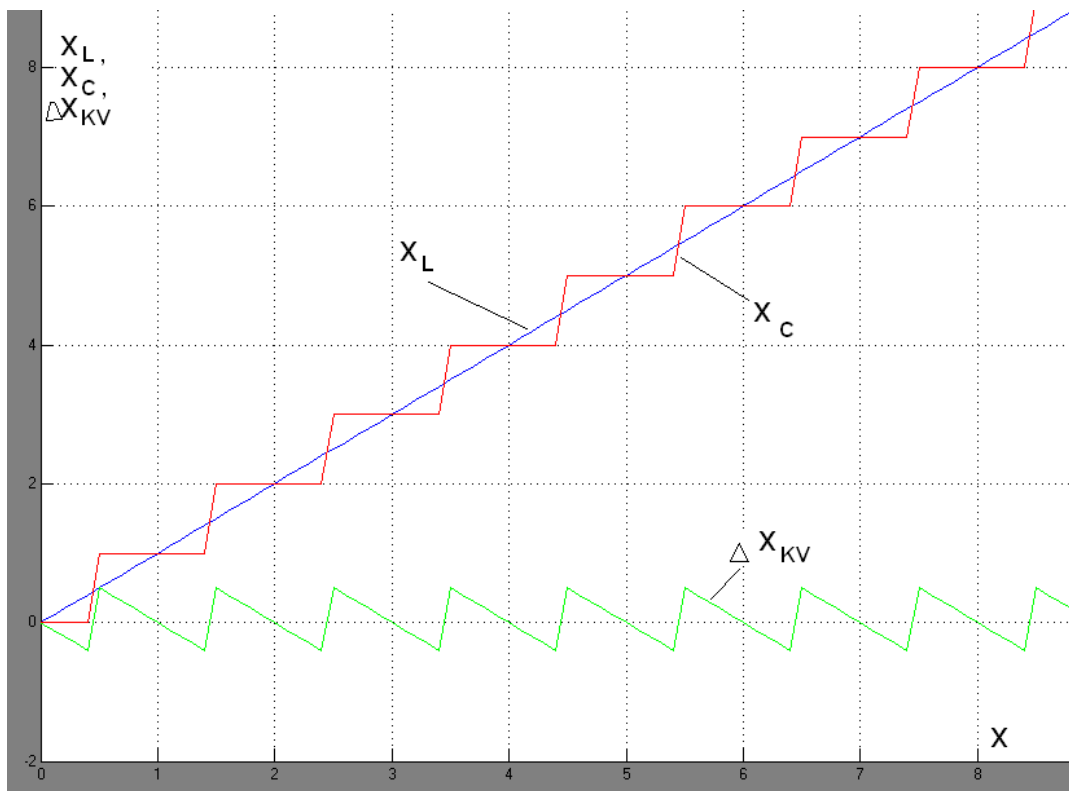
Використовуючи імітаційну модель (рис.2.7) виконаємо дослідження властивостей помилки квантування за рівнем при умові, що на вході КР із складу АЦП діють різні за фізичною природою процеси.

Дослідження статичних характеристик КР із складу АЦП при умові, що на його вході діє детермінований процес

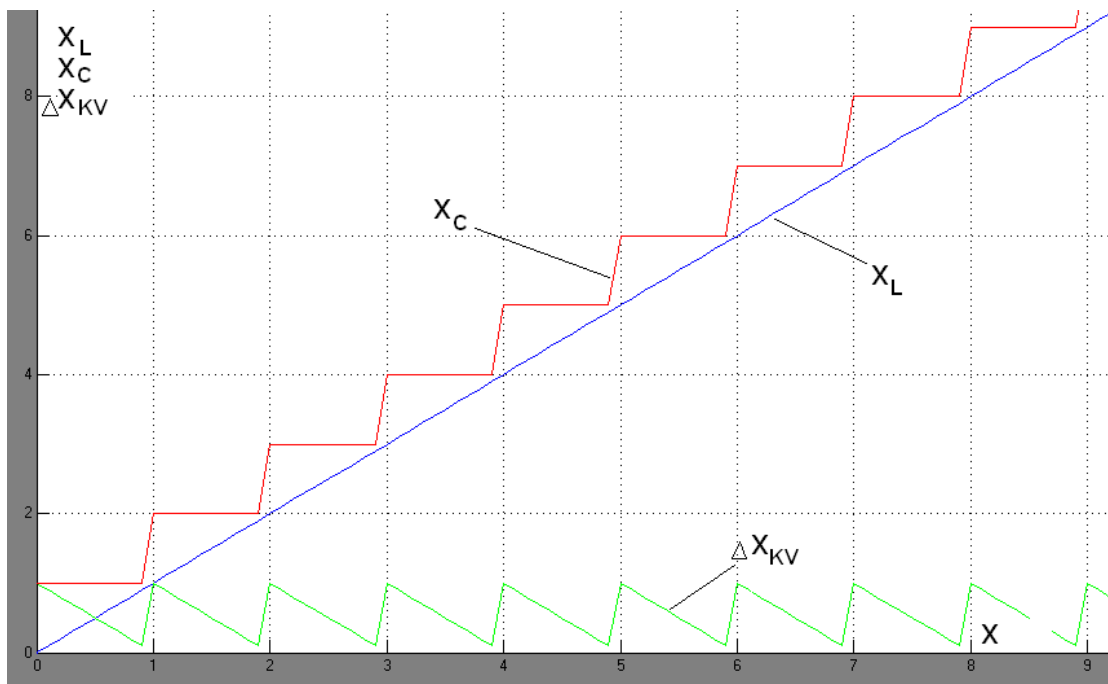
Перемикач P_1 (рис. 2.7) переключимо у нижнє положення. Встановимо час моделювання 10 с. Задамо у командному вікні MATLAB величину кроку квантування за рівнем δ_x , наприклад, у вигляді `>>deltax=1` та величину параметра квантувача за рівнем A (виконуємо три „запуски” імітаційної моделі: 1-й при $A=0$; 2-й при $A=0.5$; 3-й при $A=1$). На екрані осцилографа Scope 1 отримаємо статичні характеристики (див. рис. 2.8, а), б), в)).



а) статичні характеристики КР із складу АЦП при $A=0$;



б) статичні характеристики КР із складу АЦП при $A=0.5$;



в) статичні характеристики КР із складу АЦП при $A=1$;

Рис. 2.8. Результати імітаційного моделювання дії КР із складу АЦП при умові, що на його вхід подається детермінований процес: x_L , x_c , Δx_{kv} - відповідно лінеаризована статична характеристика, залежності вихідного цифрового сигналу та помилки квантування від вхідного неперервного сигналу x

Висновок

Результати імітаційного комп'ютерного експерименту щодо вивчення дії КР із складу АЦП при вхідному детермінованому сигналі показали, що :

- 1) залежність цифрового сигналу на виході КР від неперервного за рівнем вхідного сигналу має східчастий вигляд;
- 2) залежність помилки квантування на виході КР від неперервного за рівнем вхідного сигналу має періодичний (пилуватий) вигляд.

Дослідження статистичних характеристик КР із складу АЦП при умові, що на його вході діє стохастичний (випадковий) процес

Перемикач P_1 (рис. 2.7) переключимо у верхнє положення. Встановимо час моделювання 10000 с. Чисельні значення кроку квантування за рівнем δ_x та параметра A задамо аналогічно вище розглянутому детермінованому випадку . Виконавши послідовно три „запуски” імітаційної моделі (при трьох різних значеннях A) заповнимо масиви $dxkv$ та $dxkv1$ (рис. 2.7). Використовуючи масив $dxkv$ та функції обробки статистичних даних системи комп'ютерної математики MATLAB, побудуємо гістограми (див.рис. 2.9, 2.10, 2.11) та обчислимо елементарні статистичні характеристики:

- 1) $A=0$

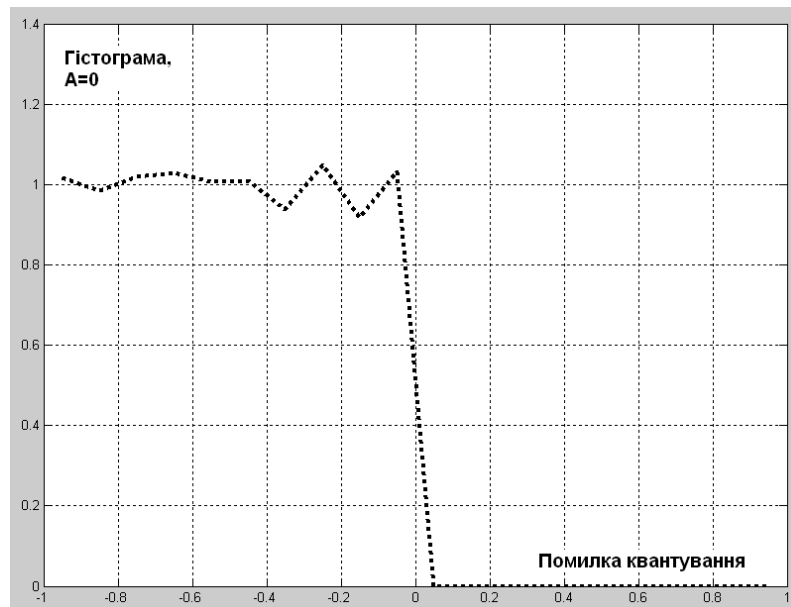


Рис.2.9. Гістограма помилки квантування за рівнем, побудована для $A=0$

Лістинг команд системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink, які використовувались при побудові гістограми та обчисленні елементарних статистичних характеристик має вигляд:

```
>> A=0  
A = 0
```

```

>> deltax=1
deltax = 1
>>% "Start" моделі див. рис. 2.7. Заповнення масивів dxkv та dxkv1
>> x=-0.95:0.1:0.95;
>> y=hist(dxkv,x)/(10000*0.1) % Гістограма
y =
Columns 1 through 10
    1.0160    0.9840    1.0180    1.0280    1.0070    1.0100    0.9370    1.0500    0.9190    1.0320
Columns 11 through 20
         0         0         0         0         0         0         0         0         0         0
>> plot(x,y,'k:')
>> grid on % Графічний образ гістограми
>> mean(dxkv)
ans = -0.5018 % Оцінка математичного сподівання помилки квантування за рівнем при A=0
>> cov(dxkv)
ans = 0.0835 % Оцінка дисперсії помилки квантування за рівнем при A=0
>> mean(y)*2
ans = 1.0001 % Оцінка значення щільності ймовірності рівномірного розподілу помилки
квантування за рівнем при A=0
>> cov(dxkv,dxkv1) % Оцінка кореляційного моменту між випадковою величиною, якою є
помилки квантування за рівнем, та випадковою величиною, якою є таж сама помилки
квантування за рівнем, але зсунута на одну позицію завдяки використанню при заповненні
масиву dxkv1 блоку моделювання запізнення Transport Delay1, при A=0
ans = 0.0835 -0.0001
      -0.0001 0.0835
>> corrcoef(dxkv,dxkv1) % Оцінка коефіцієнту кореляції між випадковою величиною, якою є
помилки квантування за рівнем, та випадковою величиною, якою є таж сама помилки
квантування за рівнем, але зсунута на одну позицію завдяки використанню при заповненні
масиву dxkv1 блоку моделювання запізнення Transport Delay1, при A=0
ans = 1.0000 -0.0016
      -0.0016 1.0000

```

Як бачимо із наведеного лістингу, оцінки математичного сподівання, дисперсії та щільності ймовірності майже співпадають із теоретичними значеннями, які відповідно дорівнюють -0.5, 0.0833, 1 (див. розділ 2.5). Оцінки відповідно кореляційного моменту та коефіцієнту кореляції (ці оцінки розташовані на допоміжній діагоналі матриць, що отримані за допомогою використання функцій cov та corrcoef) на два порядки менші за числа, що розташовані на основній діагоналі. Це означає - скоріш за все кореляції не існує, що співпадає із теоретичними положеннями розділу 2.5.

2) A=0.5

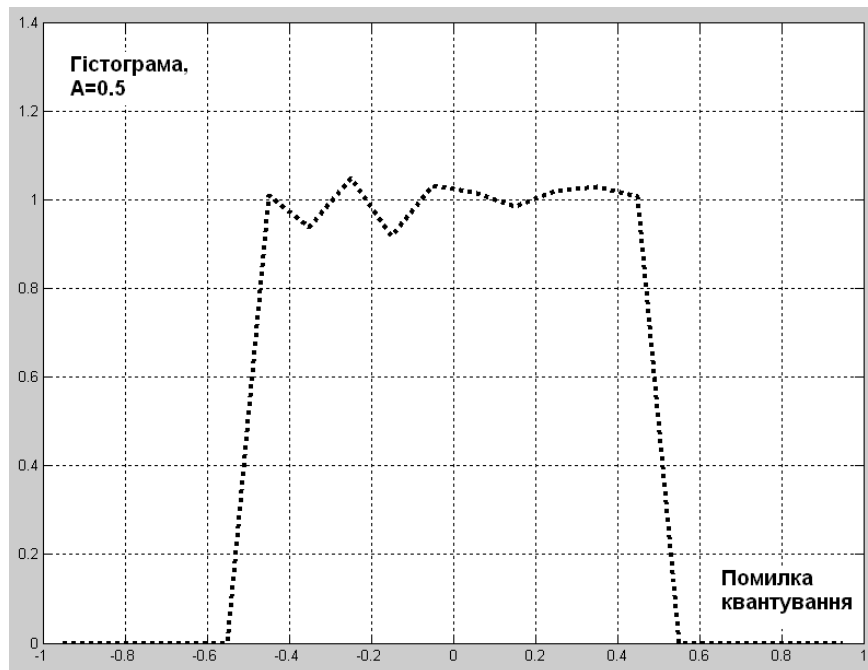


Рис.2.10. Гістограма помилки квантування за рівнем, побудована для $A=0.5$

Лістинг команд системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink, які використовувались при побудові гістограми та обчисленні елементарних статистичних характеристик має вигляд:

```
>> A=0.5
A = 0.5
>> deltax=1
deltax = 1
>>% "Start" моделі див. рис. 2.7. Заповнення масивів dxkv та dxkv1
>> x=-0.95:0.1:0.95;
>> y=hist(dxkv,x)/(10000*0.1) % Гістограма
y =
Columns 1 through 10
0 0 0 0 0 1.0100 0.9370 1.0500 0.9190 1.0320
Columns 11 through 20
1.0160 0.9840 1.0180 1.0280 1.0070 0 0 0 0 0
>> plot(x,y,'k:')
>> grid on % Графічний образ гістограми
>> mean(dxkv)

ans = 0.0034 % Оцінка математичного сподівання помилки квантування за
рівнем при A=0.5
>> cov(dxkv)

ans = 0.0836 % Оцінка дисперсії помилки квантування за рівнем при A=0.5
>> mean(y)*2

ans = 1.0001 % Оцінка значення щільності ймовірності рівномірного розподілу
помилки квантування за рівнем при A=0.5
```

```
>> cov(dxkv,dxkv1) % Оцінка кореляційного моменту між випадковою величиною, якою є помилки квантування за рівнем, та випадковою величиною, якою є та ж сама помилки квантування за рівнем, але зсунута на одну позицію завдяки використанню при заповненні масиву dxkv1 блоку моделювання запізнення Transport Delay1, при A=0.5
```

```
ans = 0.0836 -0.0004  
      -0.0004 0.0836
```

```
>> corrcoef(dxkv,dxkv1) % Оцінка коефіцієнту кореляції між випадковою величиною, якою є помилки квантування за рівнем, та випадковою величиною, якою є та ж сама помилки квантування за рівнем, але зсунута на одну позицію завдяки використанню при заповненні масиву dxkv1 блоку моделювання запізнення Transport Delay1, при A=0.5
```

```
ans = 1.0000 -0.0046  
      -0.0046 1.0000
```

Як бачимо із наведеного лістингу, оцінки математичного сподівання, дисперсії та щільності ймовірності майже співпадають із теоретичними значеннями, які відповідно дорівнюють 0, 0.0833, 1 (див. розділ 2.5). Оцінки відповідно кореляційного моменту та коефіцієнту кореляції (ці оцінки розташовані на допоміжній діагоналі матриць, що отримані за допомогою використання функцій cov та corrcoef) на два порядки менші за числа, що розташовані на основній діагоналі. Це означає - скоріш за все кореляції не існує, що співпадає із теоретичними положеннями розділу 2.5.

3) A=1

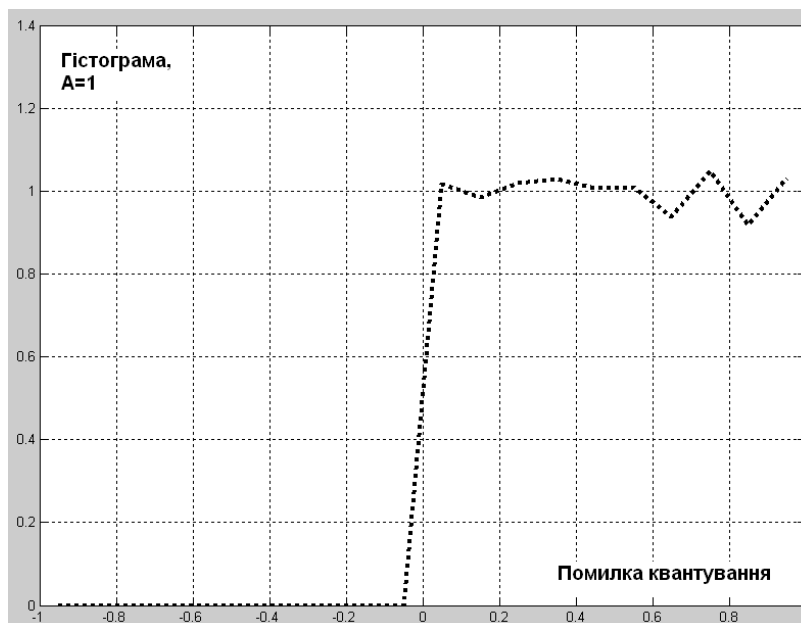


Рис.2.11. Гістограма помилки квантування за рівнем, побудована для A=1

Лістинг команд системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink, які використовувались при побудові гістограми та обчисленні елементарних статистичних характеристик має вигляд:

```

>> A=1
A = 1
>> deltax=1
deltax = 1
>>% "Start" моделі див. рис. 2.7. Заповнення масивів dxkv та dxkv1
>> x=-0.95:0.1:0.95;
>> y=hist(dxkv,x)/(10000*0.1) % Гістограма
y =
Columns 1 through 10
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Columns 11 through 20
1.0160 0.9840 1.0180 1.0280 1.0070 1.0100 0.9370 1.0500 0.9190
1.0320
>> plot(x,y,'k:')
>> grid on % Графічний образ гістограми
>> mean(dxkv)
ans = 0.4982 % Оцінка математичного сподівання помилки квантування за рівнем
при A=1
>> cov(dxkv)
ans = 0.0835 % Оцінка дисперсії помилки квантування за рівнем при A=0.5
>> mean(y)*2
ans = 1.0001 % Оцінка значення щільності ймовірності рівномірного розподілу
помилки квантування за рівнем при A=1
>> cov(dxkv,dxkv1) % Оцінка кореляційного моменту між випадковою величиною,
якою є помилки квантування за рівнем, та випадковою величиною, якою є таж
сама помилки квантування за рівнем, але зсунута на одну позицію завдяки
використанню при заповненні масиву dxkv1 блоку моделювання запізнення
Transport Delay1, при A=1
ans = 0.0835 -0.0002
-0.0002 0.0835
>> corrcoef(dxkv,dxkv1) % Оцінка коефіцієнту кореляції між випадковою
величиною, якою є помилки квантування за рівнем, та випадковою величиною,
якою є таж сама помилки квантування за рівнем, але зсунута на одну позицію
завдяки використанню при заповненні масиву dxkv1 блоку моделювання
запізнення Transport Delay1, при A=0.5
ans = 1.0000 -0.0019
-0.0019 1.0000

```

Як бачимо із наведеного лістингу, оцінки математичного сподівання, дисперсії та щільності ймовірності майже співпадають із теоретичними

значеннями, які відповідно дорівнюють 0.5, 0.0833, 1 (див. розділ 2.5). Оцінки відповідно кореляційного моменту та коефіцієнту кореляції (ці оцінки розташовані на допоміжній діагоналі матриць , що отримані за допомогою використання функцій cov та corrcoef) на два порядки менші за числа, що розташовані на основній діагоналі. Це означає - скоріш за все кореляції не існує, що співпадає із теоретичними положеннями розділу 2.5.

Загальний висновок

Результати імітаційного комп'ютерного експерименту повністю підтверджують теоретичні висновки, що були отримані у розділах 2.1-2.5.