

З.Р.Мичуда^{1,3}, Л.З.Мичуда², У.С.Антонів¹Національний університет “Львівська політехніка”,
¹кафедра комп’ютеризованих систем автоматики,
²кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів;
³Політехніка Сьвентокжиска в Кельцах, Польща

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПАРАЗИТНИХ МІЖЕЛЕКТРОДНИХ ЄМНОСТЕЙ В ЛОГАРИФМІЧНИХ АЦП З НАГРОМАДЖЕННЯМ ЗАРЯДУ НА ПОСЛІДОВНИХ ПАСИВНИХ КОНДЕНСАТОРНИХ КОМІРКАХ

О Мичуда З.Р., Мичуда Л.З., Антонів У.С., 2008

Запропоновано математичні моделі похибок логарифмічних АЦП з нагромадженням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках, наведено результати моделювання та дано оцінку точності.

The mathematical models of errors of logarithmic ADC, based on accumulation of a charge in serial passiv condensers cells are offered, the results of modelling are presented and the valuation of accuracy are given.

Постановка задачі. Для систем автоматики та автоматизації велике значення мають характеристики аналого-цифрових перетворювачів, які забезпечують спряження аналогових давачів з обчислювальною технікою для оброблення результатів вимірювання. Широким діапазоном вхідних сигналів вигідно виділяються логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі, які можуть бути виконані з використанням властивостей напівпровідникового р-п переходу, розрядного РС-кола або комірки з комутованими конденсаторами.

Аналіз останніх досліджень логарифмічних АЦП. Сьогодні найвищі технічні характеристики забезпечують логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі (ЛАЦП) на комутованих конденсаторах, які вперше [1] були реалізовані на кафедрі автоматики та телемеханіки Національного університету “Львівська політехніка”. Ці ЛАЦП реалізують на основі явищ перерозподілу і нагромадження заряду у комутованих конденсаторних комірках. Залежно від виконання конденсаторні комірки (КК) можуть бути активними або пасивними – перші відрізняються від других тим, що містять (окрім конденсаторів і аналогових ключів) ще й підсилювачі. Хоч дослідженню ЛАЦП на комутованих конденсаторах присвячено порівняно багато робіт [1–7], ЛАЦП з нагромадженням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках [1,6] вивчені в теоретичному сенсі недостатньо, а відсутність їх математичного моделювання ускладнює практичну реалізацію і оптимізацію.

Метою статті є розроблення математичних моделей похибок ЛАЦП з нагромадженням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках і кількісна оцінка цих похибок з урахуванням параметрів сучасних елементів.

Фізична модель ЛАЦП з нагромадженням заряду на послідовній пасивній КК. Спрощена функціональна схема ЛАЦП з нагромадженням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці (КК) показана на рис.1, де позначено: C_n і C_d –нагромаджувальний і дозувальний конденсатори, К0-К4 – аналогові ключі 1-4, БК – буферний каскад, Км – компаратор, СВ – схема віднімання, $U_{вх}$ і U_0 – вхідна і опорна напруги, U_y – напруга управління, КП – вихід сигналу “Кінець перетворення”.

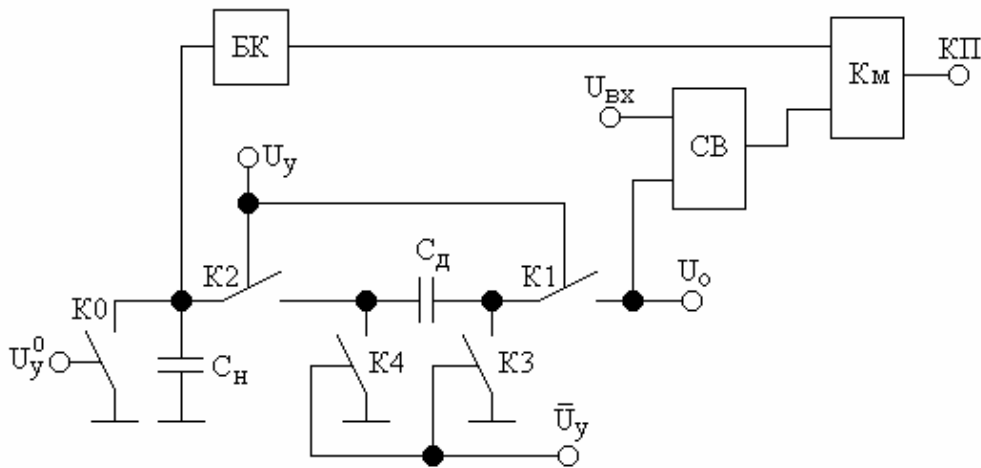


Рис.1. Спрощена функціональна схема ЛАЦП з нагромадженням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці

З метою підвищення точності ЛАЦП за рахунок виключення можливості накладання станів включення-виключення окремих ключів, як і у ЛАЦП з перерозподілом заряду, ми ввели роздільчі паузи між фазами перерозподілу і розряду. Тривалість цих пауз повинна вибиратися достатньою для надійного спрацювання ключів.

Отже, у кожному такті перетворення ЛАЦП з нагромадженням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці існуватимуть чотири фази роботи (Ф1-Ф4), кожна з яких визначатиме вигляд моделі ЛАЦП:

Ф1) нагромадження заряду конденсатором C_n , що відбувається при розімкнутих ключах K0, K3, K4 і замкнутих ключах K1, K2;

Ф2) перша пауза, за якої розімкнуті всі ключі, K0-K4;

Ф3) розряд дозувального конденсатора C_d , що відбувається за розімкнутих ключів K0, K1, K2 і замкнутих ключів K3, K4;

Ф4) друга пауза, за якої розімкнуті всі ключі, K0-K4.

Розглядаючи спрощену функціональну схему такого ЛАЦП (рис.1), можемо відзначити, що неідеальність елементів проявлятиметься через впливи паразитних міжелектродних ємностей, струмів витікання і розузгодження ємностей конденсаторів комірок.

Вплив паразитних міжелектродних ємностей зводиться до впливу паразитних міжелектродних ємностей аналогових ключів конденсаторної комірочки і вхідної ємності буферного каскаду.

Із розгляду побудови і особливостей роботи схеми ЛАЦП з нагромадженням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці (рис.1) очевидно таке:

1) паразитні міжелектродні ємності аналогових ключів призводять до безпосередньої зміни ємностей нагромаджувального та дозувального конденсаторів;

2) при замкнутих ключах K1, K2 (нагромадження заряду нагромаджувальним конденсатором C_n) напруга управління U_y проникає через міжелектродні ємності ключа K2 затвор-стік ($C_{зс2}$) і затвор-витік ($C_{зв2}$) на паралельно з'єднані нагромаджувальний C_n і дозувальний C_d конденсатори, а паразитна ємність $C_{зс2}$ нагромаджує паразитний заряд, пропорційний сумі напруги управління та напруги на нагромаджувальному конденсаторі;

3) при замкнутих ключах K3, K4 і розімкнутих ключах K1, K2 (розряд дозувального конденсатора через замкнуті ключі K3, K4) паразитний заряд, нагромаджений ємністю $C_{зс2}$ під час дії напруги управління U_y , передається на нагромаджувальний конденсатор, змінюючи рівень напруги на ньому.

Отже, внаслідок впливу паразитних міжелектродних ємностей у ЛАЦП з нагромадженням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках існують такі ефекти:

– безпосередня зміна ємностей дозувального і нагромаджувального конденсаторів;

- проникнення напруги управління;
- передача паразитного заряду.

Крім паразитних ємностей, похибку перетворення таких ЛАЦП викликать і струми витікання компонентів схеми, зокрема, дозувального та нагромаджувального конденсаторів, аналогових ключів (К0-К4), а також – вхідний струм буферного каскаду.

Проаналізуємо впливи усіх вищезгаданих паразитних факторів на роботу ЛАЦП з нагромадженням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках.

Математичні моделі похибок ЛАЦП з нагромадженням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці. На рис.2 показана модель ЛАЦП з нагромадженням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці з урахуванням паразитних ємностей. Індеси біля позначень ємностей вказують номер ключа, якому належить відповідна ємність. Вхідна ємність буферного каскаду позначена як $C_{вх}$.

Вплив паразитних міжелектродних ємностей проявлятиметься через:

- 1) безпосередню зміну ємностей дозувального та нагромаджувального конденсаторів;
- 2) проникнення напруги управління;
- 3) передачу паразитного заряду.

Безпосередня зміна ємностей нагромаджувального та дозувального конденсаторів. Значення основи логарифму ζ в ЛАЦП з нагромадженням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці залежить від співвідношення ємностей дозувального і нагромаджувального конденсаторів. Проте, як бачимо з рис. 2, паразитні міжелектродні ємності змінюють значення ємностей дозувального та нагромаджувального конденсаторів. З урахуванням з'єднань цих ємностей і за допущення рівності відповідних ємностей ключів, тобто $C_{зв1} = C_{зв2} = C_{зв0} = C_{зв}$, $C_{зс1} + C_{зс2} + C_{зс0} = C_{зс}$ і $C_{св1} + C_{св2} + C_{св0} = C_{св}$, формула для обчислення основи логарифму набуває вигляду

$$\zeta = \frac{C_H + 3C_{зс} + 2C_{св} + C_{зв} + C_{вх}}{C_H + C_D + 3C_{зс} + 2C_{св} + C_{зв} + C_{вх}}$$

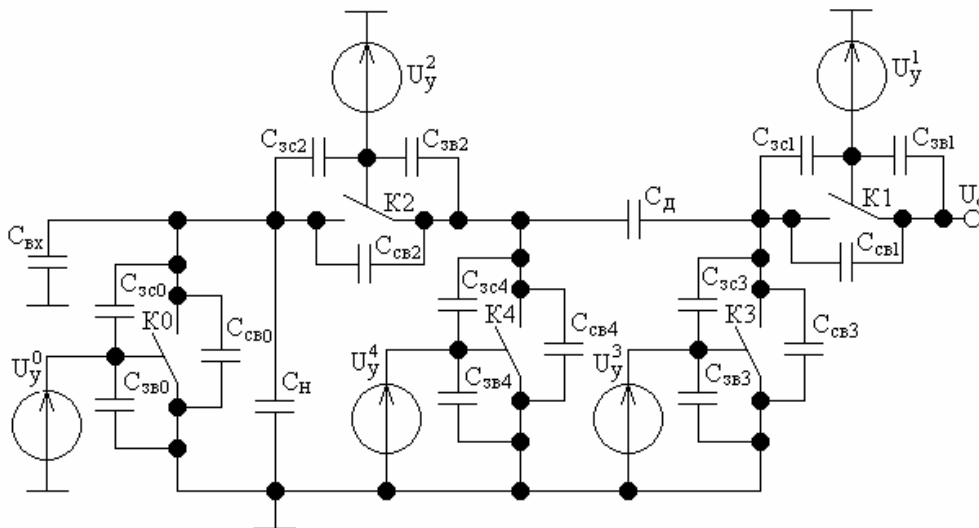


Рис.2. Модель ЛАЦП з нагромадженням заряду на послідовній пасивній КК з урахуванням паразитних міжелектродних ємностей

Підставляючи одержане значення основи логарифму у формулу (2.3.4) визначаємо абсолютну похибку ($\Delta N_{i\bar{6}}$) вихідного коду від безпосередньої зміни ємностей дозувального та нагромаджувального конденсаторів паразитними міжелектродними ємностями в i -му такті перетворення:

$$\Delta N_{i\bar{6}} = \left(\frac{1}{\log \zeta} - \frac{1}{\log \zeta_{i\bar{д}}} \right) \cdot \log \frac{U_{ВХi}}{U_0}.$$

Тут $\zeta_{i\bar{д}}$ – ідеальне значення основи логарифму; $\zeta_{i\bar{д}} = \frac{C_{н}}{C_{н} + C_{д}}$.

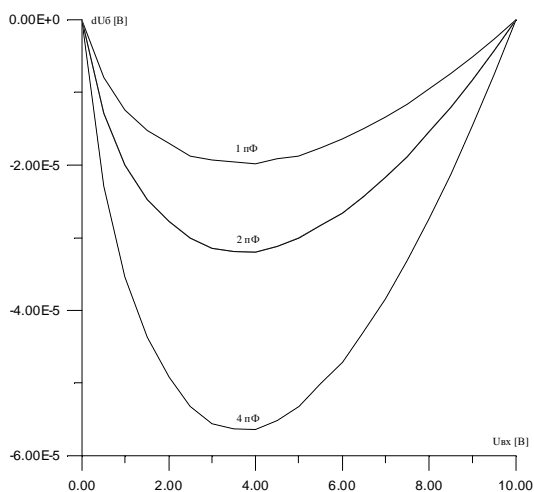


Рис. 3. Абсолютна похибка від безпосередньої зміни ємностей

Абсолютна похибка напруги на нагромаджувальному конденсаторі від безпосередньої зміни ємностей дозувального і нагромаджувального конденсаторів після N тактів перетворення матиме значення

$$\Delta U_{N\bar{6}} = (\zeta^N - \zeta_{i\bar{д}}^N) \cdot U_0.$$

Результати обчислень цієї похибки показані на рис.3. Абсолютна похибка від безпосередньої зміни ємностей дозувального та нагромаджувального конденсаторів паразитними міжелектродними ємностями елементів схеми ($C_{ВХ} = 2\text{пФ}$; $C_{зс} \approx C_{зв} \equiv C_{п}$ і $C_{св} \approx 0,5C_{п}$) є від'ємною, має екстремум і досягає мінімального значення: $-0,0198$ мВ при $C_{п}=1$ пФ; $-0,0320$ мВ при $C_{п}=2$ пФ і $-0,0564$ мВ при $C_{п}=4$ пФ.

Проникнення напруги управління

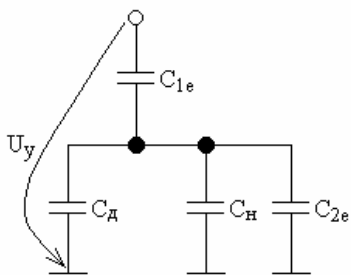


Рис. 4. Модель ЛАЦП з НЗ на послідовній КК, яка враховує ефект проникнення напруги управління:

$$C_{1e} = C_{зв} + C_{зс}; \quad C_{2e} = 2C_{св} + 2C_{зс} + C_{вх}.$$

Розглянемо як відбувається процес нагромадження заряду з врахуванням приросту напруги на нагромаджувальному конденсаторі від проникнення напруги управління через паразитні міжелектродні ємності ключа заряду K_2 .

Після дії першого тактуючого імпульсу напруга, яка установиться на нагромаджувальному конденсаторі, матиме значення:

Розглянемо зміну напруги на нагромаджувальному конденсаторі від проникнення напруги управління через паразитні ємності ключа заряду K_2 .

Знехтувавши опором ключа заряду K_2 у замкнутому стані, отримуємо модель ЛАЦП з перерозподілом заряду, яка враховує ефект проникнення напруги управління (рис.4). Як бачимо, схема рис.4 є ємнісним дільником напруги.

Напруга управління U_y ділиться цим дільником і дає приріст напруги на нагромаджувальному конденсаторі (ΔU)

$$\Delta U = \frac{C_{зв} + C_{зс}}{C_{н} + C_{д} + 3C_{зс} + 2C_{св} + C_{зв} + C_{вх}} \cdot U_y.$$

$$U_{1y} = \zeta U_o - \Delta U,$$

де ΔU – приріст напруги на нагромаджувальному конденсаторі від проникнення напруги управління; U_o – значення опорної напруги.

Після дії другого тактуючого імпульсу напруга на нагромаджувальному конденсаторі дорівнюватиме

$$U_{2y} = \zeta U_{1y} - \Delta U \quad \text{або} \quad U_{2y} = \zeta^2 U_o - \zeta \cdot \Delta U - \Delta U = \zeta^2 U_o - (\zeta + 1) \cdot \Delta U.$$

Після третього тактуючого імпульсу напруга на нагромаджувальному конденсаторі буде

$$U_{3y} = \zeta U_{2y} - \Delta U \quad \text{або}$$

$$U_{3y} = \zeta^3 U_o - \zeta(\zeta + 1) \cdot \Delta U - \Delta U = \zeta^3 U_o - (\zeta^2 + \zeta + 1) \cdot \Delta U.$$

Аналогічно знаходимо напругу на нагромаджувальному конденсаторі з урахуванням проникнення напруги управління і після наступних N імпульсів

$$U_{Ny} = \zeta^N U_o - (\zeta^{N-1} + \zeta^{N-2} + \dots + \zeta^2 + \zeta + 1) \cdot \Delta U$$

або, використовуючи відому формулу суми членів геометричної прогресії,

$$U_{Ny} = \zeta^N U_o - \frac{1 - \zeta^N}{1 - \zeta} \cdot \Delta U. \quad (5)$$

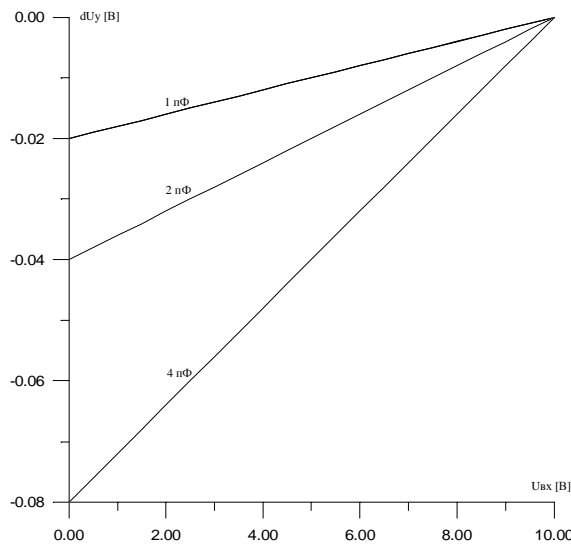


Рис.5. Абсолютна похибка від проникнення напруги управління

Перший член у правій частині формули є значенням напруги на нагромаджувальному конденсаторі після N тактуючих імпульсів з урахуванням похибки від безпосередньої зміни ємностей дозувального і нагромаджувального конденсаторів, а другий член – абсолютною похибкою цієї напруги (ΔU_{Ny}), викликаною ефектом проникнення напруги управління

$$\Delta U_{Ny} = -\frac{1 - \zeta^N}{1 - \zeta} \cdot \Delta U. \quad (6)$$

Як бачимо, отримана для ЛАЦП з нагромадженням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках формула повністю збігається з аналогічною формулою для ЛАЦП з перерозподілом заряду. Результати обчислень цієї похибки показано на рис.5.

Похибка від проникнення напруги управління ΔU_{Ny} є від'ємною, збільшується за абсолютним значенням із збільшенням вихідного коду ЛАЦП (тобто зменшенням значення $U_{вх}$) і

паразитних міжелектродних ємностей (C_n) і досягає: -20 мВ при $C_n=1$ пФ, -40 мВ при $C_n=2$ пФ і -80 мВ при $C_n=4$ пФ.

Передача паразитного заряду

Розроблена нами модель ЛАЦП з нагромадженням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках, яка враховує ефект передачі паразитного заряду, показана на рис.6. Використавши цю модель, визначимо значення напруги на нагромаджувальному конденсаторі після передачі паразитного заряду, нагромаженого ємністю $C_{зс2}$ ключа заряду К2. Зауважимо, що передача паразитного заряду відбувається після розмикання ключа К2.

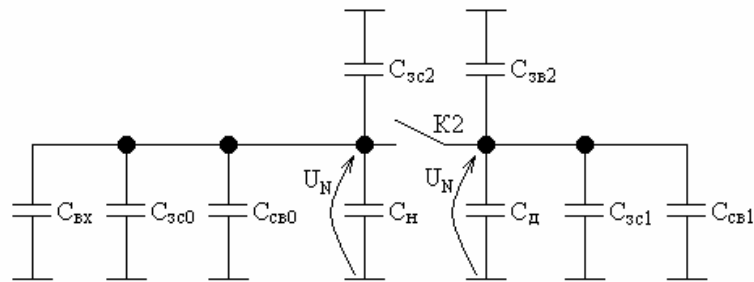


Рис.6. Модель ЛАЦП з НЗ на послідовній пасивній КК, яка враховує ефект передачі паразитного заряду

Паразитний заряд, нагромаджений ємністю $C_{зс2}$ на момент закінчення першого тактуючого імпульсу, дорівнюватиме

$$Q_{п1} = (U_y + U_{1y}) \cdot C_{зс},$$

де U_{1y} – визначене вище значення напруги на нагромаджувальному конденсаторі після першого тактуючого імпульсу з урахуванням ефекту проникнення напруги управління ($U_{1y} = \zeta U_o - \Delta U$).

Сумарний заряд системи конденсаторів при цьому

$$Q_1 = Q_{C1} + Q_{п1} \quad \text{або} \quad Q_1 = (C_n + C_{зс} + C_{св} + C_{вх}) \cdot U_{1y} + (U_y + U_{1y}) \cdot C_{зс},$$

де $C1 = C_n + C_{зс} + C_{св} + C_{вх}$.

З іншого боку, сумарний заряд

$$Q_1 = U_1 \cdot (C_n + 2C_{зс} + C_{св} + C_{вх}).$$

Прирівнявши праві частини останніх двох виразів для сумарного заряду, визначимо напругу на нагромаджувальному конденсаторі після першого тактуючого імпульсу з урахуванням ефектів передачі паразитного заряду і проникнення напруги управління:

$$U_1 = U_{1y} + k \cdot U_y \quad \text{або} \quad U_1 = \zeta U_o - \Delta U + k \cdot U_y,$$

де
$$k = \frac{C_{зс}}{C_n + 2C_{зс} + C_{св} + C_{вх}}; \quad (10)$$

Аналогічно знаходимо напругу на нагромаджувальному конденсаторі і на наступних тактах перетворення.

На другому такті перетворення під час заряду (замкнутий ключ К2) на нагромаджувальному конденсаторі установиться напруга, – з урахуванням проникнення напруги управління та передачі заряду в попередньому такті, –

$$U_{2y} = \zeta U_1 - \Delta U \quad \text{або} \quad U_{2y} = \zeta^2 U_o - (1 + \zeta) \cdot \Delta U + \zeta k U_y.$$

Після закінчення другого тактуючого імпульсу (розімкнутий ключ К2) напруга на нагромаджувальному конденсаторі

$$U_2 = U_{2y} + k \cdot U_y \quad \text{або} \quad U_2 = \zeta^2 U_0 - (1 + \zeta) \cdot \Delta U + (1 + \zeta) k U_y.$$

Аналогічно на третьому такті перетворення під час перерозподілу заряду (замкнутий ключ К2)

$$U_{3y} = \zeta U_2 - \Delta U \quad \text{або} \quad U_{3y} = \zeta^3 U_0 - (\zeta^2 + \zeta + 1) \cdot \Delta U + (1 + \zeta) \zeta k U_y$$

і після розмикання ключа К2

$$U_3 = U_{3y} + k \cdot U_y \quad \text{або}$$

$$U_3 = \zeta^3 U_0 - (\zeta^2 + \zeta + 1) \cdot \Delta U + (\zeta^2 + \zeta + 1) k U_y.$$

Остаточно, після закінчення N-го такту перетворення при розімкненому ключі заряду К2 напруга на нагромаджувальному конденсаторі (з урахуванням ефектів проникнення напруги управління і передачі паразитного заряду) дорівнюватиме

$$U_N = \zeta^N U_0 - (\zeta^{N-1} + \zeta^{N-2} + \dots + \zeta^2 + \zeta + 1) \cdot \Delta U + (\zeta^{N-1} + \zeta^{N-2} + \dots + \zeta^2 + \zeta + 1) k U_y$$

$$\text{або} \quad U_N = \zeta^N U_0 - \frac{1 - \zeta^N}{1 - \zeta} \cdot \Delta U + k_q U_y N + \frac{1 - \zeta^N}{1 - \zeta} \cdot k U_y. \quad (11)$$

У правій частині отриманої формули перший член є значенням напруги на нагромаджувальному конденсаторі після N тактуючих імпульсів з урахуванням похибки від безпосередньої зміни ємностей дозувального і нагромаджувального конденсаторів, другий – абсолютною похибкою ΔU_{Ny} від ефекту проникнення напруги управління, третій – абсолютною похибкою ΔU_{Nq} від ефекту передачі паразитного заряду ключа К2:

$$\Delta U_{Nq} = \frac{1 - \zeta^N}{1 - \zeta} \cdot k U_y. \quad (12)$$

Порівнюючи абсолютну похибку ΔU_{Ny} від ефекту проникнення напруги управління з абсолютною похибкою ΔU_{Nq} від ефекту передачі паразитного заряду бачимо, що вони мають різні знаки, тобто відбувається часткова взаємна компенсація цих похибок.

Результати обчислень абсолютної похибки ΔU_{Nq} від передачі паразитного заряду ключа К2 показані на рис.7, з якого зрозуміло, що ця похибка є додатною, зростає із збільшенням вихідного коду ЛАЦП (тобто зменшенням значення $U_{вх}$) і не перевищує 10 мВ при $C_{п1}=1$ пФ, 20 мВ при $C_{п1}=2$ пФ і 40 мВ при $C_{п1}=4$ пФ.

Остаточно результуюча абсолютна похибка перетворення ЛАЦП з нагромадженням заряду на пасивних конденсаторних комірках, спричинена впливом паразитних міжелектродних ємностей, матиме значення

$$\Delta U_{Nc} = \Delta U_{N\delta} + \Delta U_{Nq} + \Delta U_{Ny} \quad \text{або}$$

$$\Delta U_{Nc} = (\zeta^N - \zeta_i^N) \cdot U_0 + \frac{1 - \zeta^N}{1 - \zeta} \cdot (k U_y - \Delta U). \quad (13)$$

Перший член у правій частині формули – похибка від безпосередньої зміни ємностей дозувального і нагромаджувального конденсаторів, другий – похибка від передачі паразитного заряду ключа нагромадження К2 і третій – похибка від проникнення напруги управління.

Результати обчислень за формулою (13) показані на рис.8. Результуюча абсолютна похибка перетворення ΔU_{Nc} ЛАЦП з нагромадженням заряду на пасивних конденсаторних комірках, зумовлена впливом паразитних міжелектродних ємностей елементів схеми, є від'ємною, зростає за абсолютним значенням із збільшенням вихідного коду ЛАЦП (тобто зменшенням $U_{вх}$) і досягає: – 9,99 мВ при $C_{п1}=1$ пФ, – 20 мВ при $C_{п1}=2$ пФ і – 40 мВ при $C_{п1}=4$ пФ.

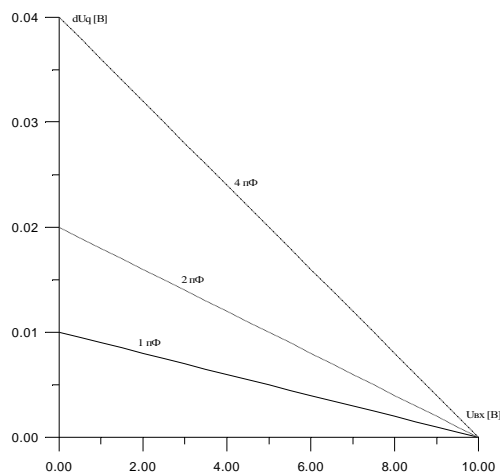


Рис. 7. Абсолютна похибка від передачі паразитного заряду

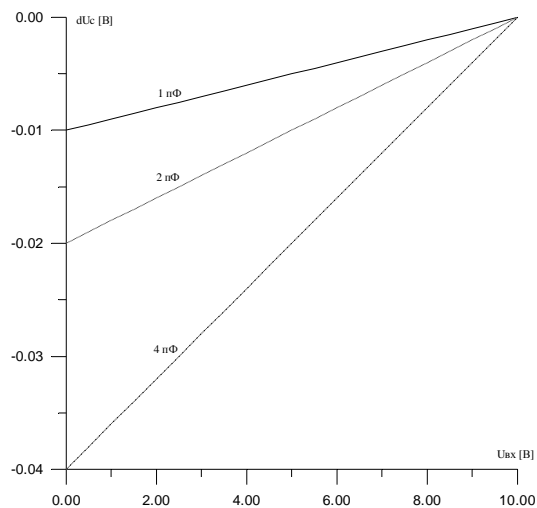


Рис. 8. Результуюча абсолютна похибка від впливу паразитних міжелектродних ємностей

Висновки. Виконане моделювання ЛАЦП з нагромадженням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комітках дозволяє зробити такі висновки:

1. Вплив паразитних міжелектродних ємностей аналогових ключів і буферного каскаду на нагромадження заряду у конденсаторних комітках відбувається через:

- а) безпосередню зміну ємностей нагромаджувального та дозувального конденсаторів;
- б) проникнення напруги управління аналогового ключа заряду (K2) в конденсаторну комірку;
- в) передачу паразитного заряду затвора аналогового ключа заряду (K2) в конденсаторну комірку.

2. Важливою перевагою ЛАЦП з НЗ на послідовних пасивних КК над ЛАЦП з НЗ на паралельних КК і ЛАЦП з перерозподілом заряду є відсутність похибки від передачі заряду ключів розряду, яка в останніх перетворювачах є домінуючою.

3. Реалізація ЛАЦП з нагромадженням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комітках на сучасній елементній базі (фірми Maxim, Analog Devices і інші забезпечують значення паразитних міжелектродних ємностей аналогових ключів менші 1 пФ) дозволяє досягти класу точності 0,2 (причому знизити результуючу інструментальну похибку перетворення до 0,1% і менше при методичній похибці 0,1% в діапазоні вхідних сигналів від 1 мВ до 10 В), тобто, отримати найточніші послідовні ЛАЦП.

1. Мичуда З.Р. *Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі – АЦП майбутнього*. – Львів: Простір, 2002. – 242 с. 2. Мичуда З.Р. *Моделювання впливу паразитних міжелектродних ємностей логарифмічних АЦП з нагромадженням заряду на паралельних пасивних конденсаторних комітках* // *Міжвід. наук.-техн. зб. “Вимірювальна техніка і метрологія”*. – Львів: Вища школа, 2001. – Вип. 58. – С. 26–32. 3. Мичуда З.Р. *Логарифмічні АЦП з нагромадженням заряду в активних конденсаторних комітках. Моделювання впливу паразитних ємностей* // *Міжвідомчий наук.-техн. зб. «Вимірювальна техніка і метрологія»*. – Львів: Вища школа, 2002. – Вип.59. – С. 81–87. 4. Мичуда З.Р., Мичуда Л.З., Католик Б.О. *Логарифмічні АЦП з перерозподілом заряду заряду. Моделювання впливу паразитних міжелектродних ємностей* // *Збірник наукових праць “Комп’ютерні технології друкарства”*, 2004. – № 11. – С.167–183. 5. Z.R.Mychuda, A.Z.Piskozub "A charge redistribution analog-to-digital converters modelling", *International Workshop on ADC MODELLING. PROCEEDINGS. House of Scientists, Smolenice Castle, Slovak Republic, May 7-9*. – 1996. – P.100–105. 6. Матецька Л.А., Мичуда З.Р. *Логарифмічний аналого-цифровий перетворювач з нагромадженням заряду на послідовно включених конденсаторах* // *Зб. наук. пр. “Комп’ютерні технології друкарства”*. – Львів: Українська академія друкарства, 2000. – №5. – С. 36–43. 7. Мулявка Я. *Схеми на операційних усилителях с переключаемыми конденсаторами: Пер. с польск.* – М.: Мир, 1992. – 416 с.