

Под ред. Л. Я. Мизюка. – К.: Наукова думка, 1985. – 253 с. 5. Мизюк Л. Я. О состоянии и некоторых перспективах развития информационно-измерительных систем для наземных методов индуктивной электроразведки. Отбор и передача информации. – К.: Наукова думка, 1970. – Вып. 26. – С. 49–58. 6. Бучма І. М. Метод аероелектророзвідки провідних магнітних руд. Інформаційні технології і системи. – 2001. – № 1–2. – С. 115–122. 7. Бучма І. М., Репетило Т. М., Ферчук К. В. Засоби вихрострумової діагностики корозійного стану сталевих листових конструкцій. – Львів: Вид-во “Львівська політехніка”, 2015. – 291 с.

УДК 681.335 (088.8)

З. Р. Мичуда^{1,3}, Л. З. Мичуда², У. С. Антонів¹
Національний університет “Львівська політехніка”,
¹кафедра комп’ютеризованих систем автоматики,
²кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів;
³Політехніка Сьвентокшиська в Кельцах (Польща)

ЛОГАРИФМІЧНІ АЦП З НАКОПИЧЕННЯМ ЗАРЯДУ НА ПОСЛІДОВНИХ ПАСИВНИХ КОНДЕНСАТОРНИХ КОМІРКАХ. ЧАСТИНА 2

© Мичуда З. Р., Мичуда Л. З., Антонів У. С., 2017

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

Ключові слова: логарифмічні АЦП, комутовані конденсатори, накопичення заряду, моделювання, точність.

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.

Keywords: logarithmic ADC’s, switched capacitors, charge accumulation, modeling, accuracy.

Моделювання впливу струмів витікання в ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці

Модель ЛАЦП з накопиченням заряду на пасивних послідовних конденсаторних комірках, яка враховує вплив струмів витікання елементів схеми, наведено на рис. 1.

У цій моделі відобразимо те, що вона змінюється відповідно до змін структури ЛАЦП в окремих фазах перетворення (Ф1-Ф4), кожна з яких визначатиме вигляд моделі ЛАЦП:

Ф1) накопичення заряду конденсатором C_n , що відбувається при розімкнутих ключах К0, К3, К4 і замкнутих ключах К1, К2;

Ф2) перша пауза, при якій розімкнуті всі ключі, К0-К4;

Ф3) розряд дозуючого конденсатора C_d , що відбувається при розімкнутих ключах К0, К1, К2 і замкнутих ключах К3, К4;

Ф4) друга пауза, при якій розімкнута всі ключі, К0-К4.

У моделі враховано опори витікання накопичувально (r_{ВН}) і дозувального (r_{ВД}) конденсаторів, вхідний опір буферного каскаду (r_{ВХ}) і опори аналогових ключів К0-К2 стік-витік (r_{СВ}), затвор-стік (r_{ЗС}) і затвор-витік (r_{ЗВ}).

Абсолютну похибку напруги на накопичувальному конденсаторі від струмів витікання можемо визначити, скориставшись загальновідомою формулою

$$\frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{I}{C},$$

де ΔU – зміна напруги на конденсаторі; ΔT – інтервал часу, протягом якого змінюється напруга на конденсаторі; I – струм, що тече через конденсатор; C – ємність конденсатора.

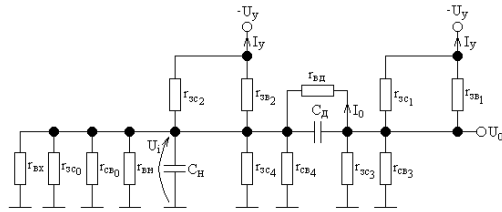


Рис. 1. Модель ЛАЦП з НЗ на пасивній послідовній КК, що враховує струми витікання у фазі Ф1

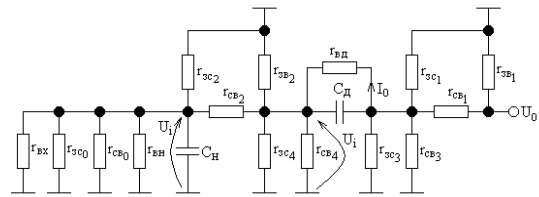


Рис. 2. Модель ЛАЦП з НЗ на пасивній послідовній КК, що враховує струми витікання у фазі Ф2

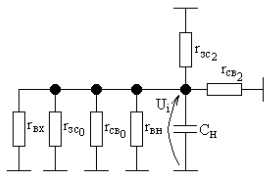


Рис. 3. Модель ЛАЦП з НЗ на пасивній послідовній КК, що враховує струми витікання у фазі Ф3

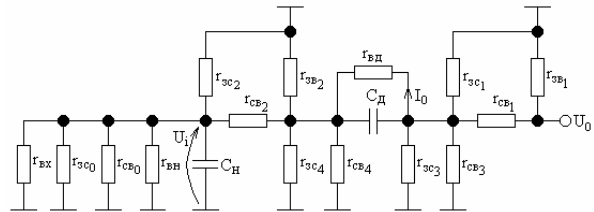


Рис. 4. Модель ЛАЦП з НЗ на пасивній послідовній КК, що враховує струми витікання у фазі Ф4

У кожному такті перетворення, як було показано вище, є чотири фази Ф1-Ф4. Тому на основі наведеного вище виразу можна визначити абсолютну похибку напруги на накопичувальному конденсаторі ЛАЦП з НЗ на послідовній пасивній конденсаторній комірці як

$$\Delta U_{Ni} = \frac{1}{C_H} \sum_{k=1}^{k=4} I_{\Phi k} \cdot t_{\Phi k} \cdot N,$$

де ΔU_{Ni} – абсолютна похибка напруги на накопичувальному конденсаторі від струмів витікання на N-ому такті перетворення; $I_{\Phi k}$ – сумарний струм через накопичувальний конденсатор у фазі перетворення “к”, причому $k=1, 2, 3, 4$; $t_{\Phi k}$ – тривалість фази перетворення “к”.

Розглядаючи рис. 1–4, визначимо насамперед сумарні струми через накопичувальний конденсатор у кожній фазі перетворення.

З урахуванням з’єднань між елементами моделі (рис. 1) знаходимо сумарний струм у фазі перетворення Ф1 за формулою

$$I_{\Phi 1} = I_0 - I_1 - I_y,$$

$$\text{де } I_0 = \frac{U_0 - U_i}{r_{ВД}}; \quad I_y = (U_i + U_y) \cdot \left(\frac{1}{r_{ЗВ}} + \frac{1}{r_{ЗС}} \right); \quad I_1 = U_i \left(\frac{2}{r_{ЗС}} + \frac{2}{r_{СВ}} + \frac{1}{r_{ВН}} + \frac{1}{r_{ВХ}} \right);$$

U_i – напруга на накопичувальному конденсаторі в i-му такті перетворення.

З урахуванням з'єднань між елементами моделі (рис. 2) і того, що струм через резистор r_{CB2} дорівнює нулю, оскільки він включений між вузлами з однаковим потенціалом, знаходимо сумарний струм у фазі перетворення $\Phi 2$:

$$I_{\Phi 2} = -I_2,$$

$$\text{де } I_2 = U_i \left(\frac{1}{r_{CB}} + \frac{2}{r_{3C}} + \frac{1}{r_{BH}} + \frac{1}{r_{BX}} \right).$$

З урахуванням з'єднань між елементами моделі (рис.3) знаходимо сумарний струм у фазі перетворення $\Phi 3$ за формулою:

$$I_{\Phi 3} = I_0 - I_2 - I_{CB2},$$

де I_{CB2} – струм між стоком-витоком ключа К2, причому $I_{CB2} = \frac{U_i}{r_{CB2}}$.

З урахуванням з'єднань між елементами моделі (рис.4) знаходимо сумарний струм у фазі перетворення $\Phi 4$:

$$I_{\Phi 4} = -I_2 - I_3,$$

$$\text{де } I_3 = \frac{U_i}{r_{CB} + r}; \quad r = \left(\frac{1}{r_{3C}} + \frac{1}{r_{CB}} + \frac{1}{r_{3B}} \right)^{-1}.$$

Тривалість окремої фази перетворення $t_{\Phi k}$ залежить від конкретних вимог до ЛАЦП і в частковому випадку, який найпростіше реалізується, тривалість всіх фаз однакова, тобто $t_{\Phi 1} = t_{\Phi 2} = t_{\Phi 3} = t_{\Phi 4} = \frac{1}{4}T$ (тут T – тривалість одного такту перетворення).

Графік абсолютної похибки напруги на накопичувальному конденсаторі (ΔU_{Ni}) від струмів витікання, обчислений за виведеними вище формулами, наведено на рис. 5. При обчисленнях було задано $t_{\Phi 1} = t_{\Phi 3} = 2\text{ мкс}$ і $t_{\Phi 2} = t_{\Phi 4} = 0,5\text{ мкс}$, тобто тривалість одного такту перетворення $T_1 = 5\text{ мкс}$; похибка квантування $\delta_k = 0,1\%$; діапазон вхідних сигналів $U_{BX} = 1\text{ мВ} - 10\text{ В}$ (максимальне значення вихідного коду $N = 9215$).

З рис.6 можна зробити висновок, що похибка від дії струмів витікання є від'ємною, не залежить від значення паразитних міжелектродних ємностей, зростає за абсолютним значенням із збільшенням вихідного коду і не перевищує $0,5\text{ мВ}$ (тобто $0,005\%$) за часу перетворення $T_n \leq 50\text{ нс}$ (при цьому вихідний код $N \leq 10000$).

Моделювання впливу паразитних ємностей у ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці

На рис. 6 наведено модель ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці з урахуванням паразитних ємностей. Індекси біля позначень ємностей вказують номер ключа, якому належить відповідна ємність. Вхідну ємність буферного каскаду позначено як C_{BX} .

Вплив паразитних міжелектродних ємностей буде проявлятися через:

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

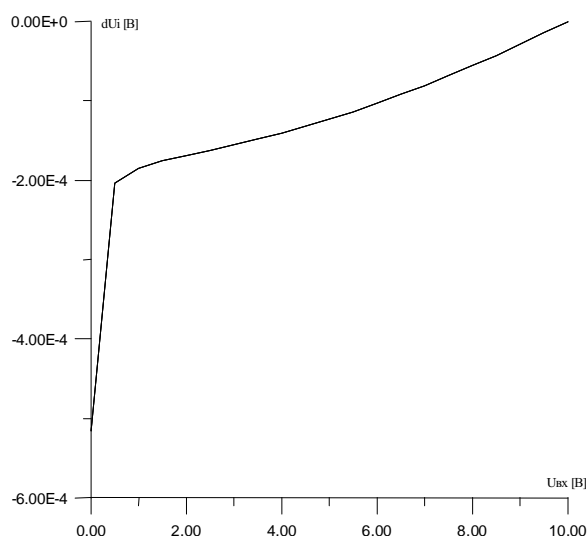


Рис. 5. Абсолютна похибка від впливу струмів витікання в ЛАЦП з НЗ на пасивній послідовній КК

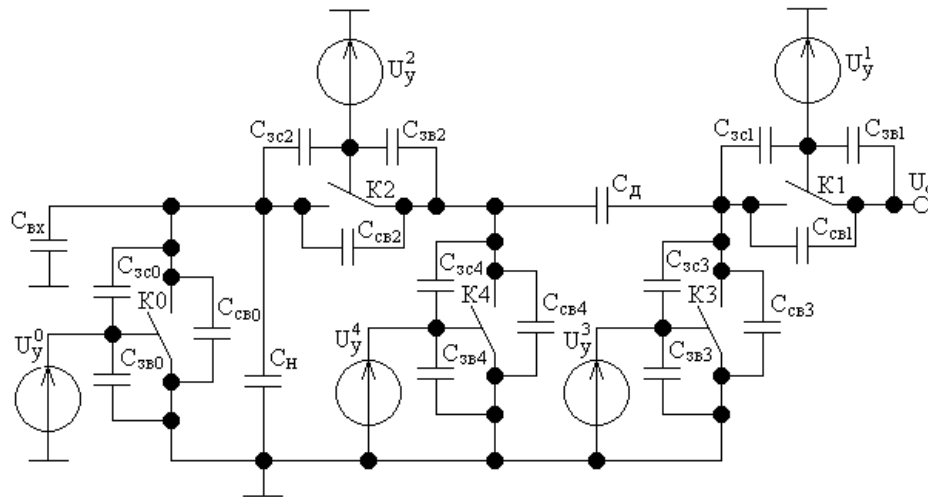


Рис. 6. Модель ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній КК з урахуванням паразитних міжелектродних ємностей

Безпосередня зміна ємностей накопичувального та дозувального конденсаторів

Значення основи логарифма ζ у ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній коміріці залежить від співвідношення ємностей дозувального і накопичувального конденсаторів. Проте, як видно з рис. 6, паразитні міжелектродні ємності змінюють значення ємностей дозувального та накопичувального конденсаторів. З урахуванням з'єднань цих ємностей і при допущенні 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 логарифма набуває вигляду

$$\zeta = \frac{C_H + 3C_{зс} + 2C_{св} + C_{зв} + C_{ВХ}}{C_H + C_Д + 3C_{зс} + 2C_{св} + C_{зв} + C_{ВХ}}$$

Враховуючи одержане значення основи логарифма, визначаємо абсолютну похибку ($\Delta N_{i\delta}$) вихідного коду від безпосередньої зміни ємностей дозувального та накопичувального конденсаторів паразитними міжелектродними ємностями в i -му такті перетворення:

$$\Delta N_{i\delta} = \left(\frac{1}{\log \zeta} - \frac{1}{\log \zeta_{i\delta}} \right) \cdot \log \frac{U_{ВХi}}{U_0},$$

де $\zeta_{i\delta}$ – ідеальне значення основи логарифма;

$$\zeta_{i\delta} = \frac{C_H}{C_H + C_Д}.$$

Абсолютна похибка напруги на накопичувальному конденсаторі від безпосередньої зміни ємностей дозувального і накопичувального конденсаторів після n тактів перетворення

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

Результати обчислень цієї похибки наведено на рис.7. Абсолютна похибка від безпосередньої зміни ємностей дозувального

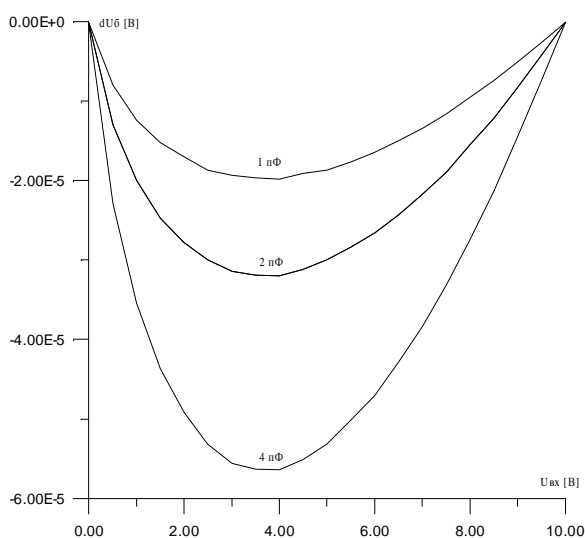


Рис. 7. Абсолютна похибка від безпосередньої зміни ємностей

та накопичувального 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

Розглянемо, зміну напруги на накопичувальному конденсаторі від проникнення напруги управління через паразитні ємності ключа заряду К2. Знехтувавши опором ключа заряду К2 у замкнутому стані, отримаємо модель ЛАЦП з перерозподілом заряду, яка враховує ефект проникнення напруги управління (рис. 8). Як видно, схема рис. 8 є ємнісним дільником напруги.

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

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

Розглянемо як відбувається процес накопичення заряду з врахуванням приросту напруги на накопичувальному конденсаторі від проникнення напруги управління через паразитні міжелектродні ємності ключа заряду К2.

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

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

де ΔU – приріст напруги на накопичувальному конденсаторі від проникнення напруги управління;

U_o – значення опорної напруги.

Після дії другого тактуючого імпульса напруга на накопичувальному конденсаторі дорівнюватиме

$$U_{2y} = \zeta U_{1y} - \Delta U \quad \text{або}$$

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

Після третього тактуючого імпульса напруга на накопичувальному 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 накопичувальному 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:

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

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

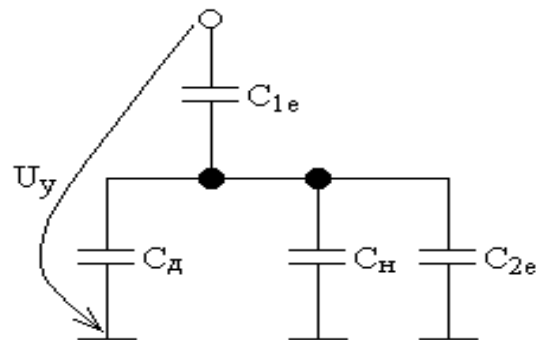


Рис. 8. Модель ЛАЦП з НЗ на послідовній КК, яка враховує ефект проникнення напруги управління:

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

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

Як бачимо, отримана для ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках формула повністю збігається з аналогічною формулою для ЛАЦП з перерозподілом заряду. Результати обчислень цієї похибки наведено на рис. 9.

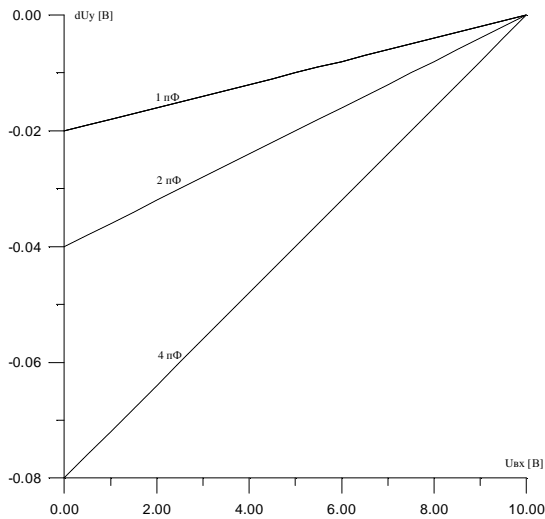


Рис. 9. Абсолютна похибка від проникнення напруги управління

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 ($C_{п}$) і досягає: -20 мВ при $C_{п}=1$ пФ, -40 мВ при $C_{п}=2$ пФ і -80 мВ при $C_{п}=4$ пФ.

Передавання паразитного заряду

Розроблена нами модель ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках, в якій враховано ефект передавання паразитного заряду, наведена на рис. 10. Використавши цю модель, визначимо значення напруги на накопичувальному конденсаторі після передавання паразитного заряду, накопиченого ємністю $C_{зс2}$ ключа заряду К2. Зауважимо, що передається паразитний заряд після розмикання ключа К2.

Паразитний заряд, накопичений 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 накопичувальному конденсаторі після першого тактуючого імпульсу з урахуванням ефекту проникнення напруги управління ($U_{1y} = \zeta U_o - \Delta U$).

Сумарний заряд системи конденсаторів при цьому

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

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

З іншого боку, сумарний заряд

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

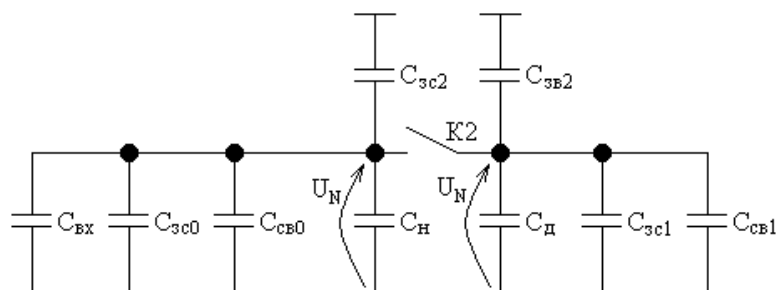


Рис. 10. Модель ЛАЦП з N3 на послідовній пасивній КК, яка враховує ефект передавання паразитного заряду

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

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

$$\text{де } k = \frac{C_{зс}}{C_n + 2C_{зс} + C_{св} + C_{вх}}.$$

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

На другому такті перетворення під час заряду (замкнутий ключ К2) на накопичувальному конденсаторі установиться напруга – з урахуванням проникнення напруги управління та передавання 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 імпульса (розімкнутий ключ К2) напруга на накопичувальному конденсаторі

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

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

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

і після розмикання ключа К2

$$U_3 = U_{3y} + k \cdot U_y \quad \text{або} \quad U_3 = \zeta^3 U_o - (\zeta^2 + \zeta + 1) \cdot \Delta U + (\zeta^2 + \zeta + 1) k U_y.$$

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

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

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

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

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

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

Результати обчислень абсолютної похибки ΔU_{Nq} від передавання паразитного заряду ключа К2 наведено на рис. 11, з якого видно, що ця похибка є додатною, зростає із збільшенням вихідного коду ЛАЦП (тобто зменшенням значення $U_{вх}$) і не перевищує 10 мВ при $C_n=1$ пФ, 20 мВ при $C_n=2$ пФ і 40 мВ при $C_n=4$ пФ.

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

$$\Delta U_{Nc} = \Delta U_{N\delta} + \Delta U_{Nq} + \Delta U_{Ny} \quad \text{або} \quad \Delta U_{Nc} = (\zeta^N - \zeta_i^N) \cdot U_0 + \frac{1 - \zeta^N}{1 - \zeta} \cdot (kU_y - \Delta U).$$

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

Результати обчислень за останньою формулою наведено на рис. 12. Результуюча абсолютна похибка перетворення ΔU_{Nc} ЛАЦП з накопиченням заряду на пасивних конденсаторних комірках, спричинена 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 $C_{п}=1$ пФ, -20 мВ при $C_{п}=2$ пФ і -40 мВ при $C_{п}=4$ пФ.

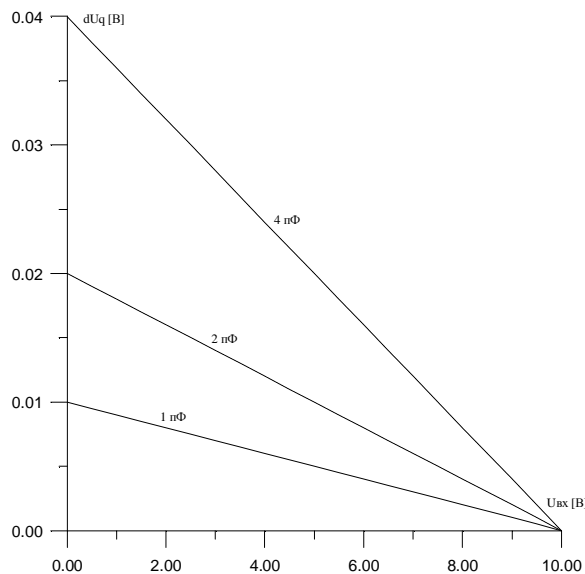


Рис. 11. Абсолютна похибка від передавання паразитного заряду

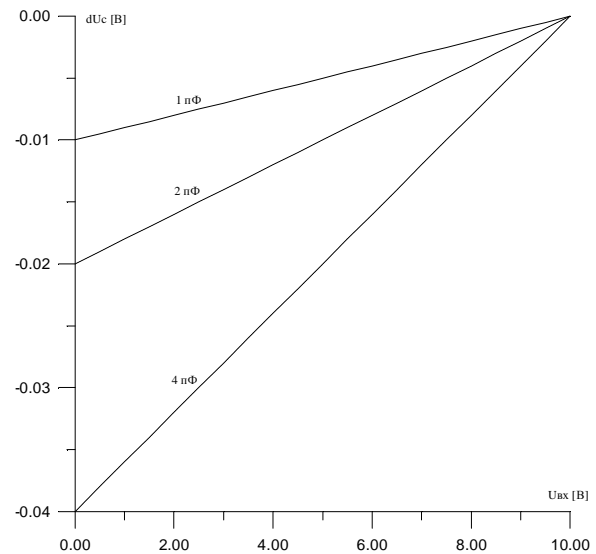


Рис. 12. Результуюча абсолютна похибка від впливу паразитних міжелектродних ємностей

Оцінка точності ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірни

Похибка ЛАЦП, як і будь-якого іншого засобу вимірювання чи перетворення, складається з методичної та інструментальної похибок.

Як загальновідомо, методичною похибкою АЦП є похибка квантування (δ_k), а інструментальною похибкою (δ_i) є похибка, що виникає внаслідок неідеальності елементів АЦП.

Визначимо методичну та інструментальну похибки, за якими знайдемо результуючу похибку ЛАЦП.

При додаванні похибок враховуватимемо наявність кореляційних зв’язків між окремими похибками і об’єднаємо їх у відповідні групи за значенням коефіцієнта кореляції. Суму двох похибок з урахуванням кореляції знаходимо за відомою формулою:

$$\delta_{12} = \sqrt{\delta_1^2 \pm 2k\delta_1\delta_2 + \delta_2^2},$$

де δ_1 і δ_2 – відповідно перша і друга похибки;

k – коефіцієнт кореляції, який дорівнює нулю за відсутності кореляції між похибками δ_1 і δ_2 та одиниці – за сильної кореляції.

Зауважимо, що далі при визначенні результуючої похибки вживатимемо як окремі складові зведені похибки.

Результуюча похибка ЛАЦП (δ_p) дорівнюватиме сумі похибок інструментальної і квантування, які не є корельовані між собою. Тому вважаємо, що коефіцієнт кореляції дорівнює нулю ($\kappa=0$) і визначимо результуючу похибку ЛАЦП за формулою:

$$d_p = \sqrt{d_i^2 + d_\kappa^2}.$$

Зауважимо, що ЛАЦП з перерозподілом і ЛАЦП з накопиченням заряду матимуть однакові методичні похибки, тобто похибки квантування δ_κ , і відрізнятимуться лише значеннями інструментальних похибок.

Відносна похибка квантування (δ_κ) ЛАЦП залежить від вибору значення основи логарифму ζ і є сталою у всьому динамічному діапазоні вхідних сигналів. Її значення можна знайти за наведеною вище формулою:

$$d_\kappa = \frac{1-z}{z} \cdot 100\%.$$

Так, $\delta_\kappa=0,7\%$ при $\zeta=0.993116$ (це відповідає максимальному значенню вихідного коду ЛАЦП $N=1000$); $\delta_\kappa=0,35\%$ при $\zeta=0.9965522$ ($N=2000$) і $\delta_\kappa=0,1\%$ при $\zeta=0.9990009$ ($N=9214$).

Інструментальна похибка ЛАЦП визначатиметься неідеальністю компонентів схеми ЛАЦП і, зокрема, впливом паразитних міжелектродних ємностей, струмів витікання і розузгодження дозувального та накопичувального конденсаторів.

При цьому нехтуємо похибкою від напруг зміщення буферного каскаду та компаратора, а також відхиленням від номінального значення ємностей дозувального та накопичувального конденсаторів, що задають значення основи логарифма ζ , оскільки ці складові компенсуються при налаштуванні схеми.

Оцінюємо інструментальну похибку різних ЛАЦП, враховуючи використання високоякісних операційних підсилювачів з малими вхідними струмами: наприклад, К1409, для яких вхідні струми менші за 50 пА, і аналогових ключів, наприклад, серії К590, для кращих з яких значення паразитних міжелектродних ємностей не перевищують 2 пФ, а струми витікання – 100 пА.

Інструментальна похибка ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній КК дорівнює (оскільки її складові не корельовані між собою, то коефіцієнт кореляції $\kappa=0$):

$$d_i = \sqrt{d_c^2 + d_{le}^2}.$$

У діапазоні вхідних сигналів 1 мВ – 10 В зведена похибка ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній КК від впливу паразитних міжелектродних ємностей не перевищуватиме 0,1 % (для $C_{п} \leq 1$ пФ), а від струмів витікання – менша за 0,005 %. Оскільки остання значно менша, то інструментальна похибка ЛАЦП фактично визначається похибкою від впливу паразитних міжелектродних ємностей, тобто $\delta_i \approx \delta_c \leq 0,1\%$.

Отже, при заданні похибки квантування 0,1 % результуюча похибка перетворення ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній КК не перевищуватиме значення

$$\delta_p = \sqrt{0,1^2 + 0,1^2} = 0,141\% \leq 0,15\%.$$

Висновки

Проведене моделювання ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках дає змогу зробити такі висновки:

1. Вплив паразитних міжелектродних ємностей аналогових ключів і буферного каскаду на процеси накопичення заряду у конденсаторних комірках відбувається через:
 - а) безпосередню зміну ємностей накопичувального та дозувального конденсаторів;
 - б) проникнення напруги управління аналогового ключа заряду (К2) у КК;
 - в) передавання паразитного заряду затвора аналогового ключа заряду (К2) у КК.

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 передавання заряду ключів розряду, яка в останніх перетворювачах є домінуючою.

3. Реалізація ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках на сучасній елементній базі (фірми Maxim, Analog Devices та інші забезпечують значення паразитних міжелектродних ємностей аналогових ключів, менші за 1 пФ) дає змогу досягти класу точності 0,15 (при похибці квантування 0,1 % у діапазоні вхідних сигналів від 1 мВ до 10 В), тобто отримати найбільш точні послідовні ЛАЦП.

4. Інструментальна похибка накопичується із збільшенням значення вихідного коду. Тому для подальшого зменшення результуючої похибки ЛАЦП необхідно зменшувати кількість тактів перетворення, тобто треба переходити до складніших алгоритмів перетворення, наприклад, порозрядного, грубого та точного вимірювання чи інших.

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 накопиченням заряду на паралельних пасивних конденсаторних комірках // Міжвідомчий наук.-техн. зб. “Вимірювальна техніка і метрологія”*. – Л.: Вища школа, 2001. – Вип. 58. – С. 26–32. 3. Мичуда З. Р., Мичуда Л. З., Католик Б. О. *Логарифмічні АЦП з перерозподілом заряду. Моделювання впливу паразитних міжелектродних ємностей // Збірник наукових праць “Комп’ютерні технології друкарства”*. – 2004. – № 11. – С. 167–183.

УДК 519.6

І. М. Журавель

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра безпеки інформаційних технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНВАРІАНТІВ ЗОБРАЖЕННЯ НА ОСНОВІ ЙОГО ФРАКТАЛЬНОЇ МОДЕЛІ

© Журавель І. М., 2017

Наведено результати досліджень впливу зміни рівня інтенсивності, кута повороту та масштабу зображень на значення їх фрактальної розмірності. Встановлено умови, за яких фрактальну розмірність можна вважати інваріантною ознакою металографічних зображень.

Ключові слова: металографічні зображення, фрактальна розмірність, афінні перетворення.

The paper presents the results of studies of the impact of changes in intensity, angle of rotation and scale images on the importance of fractal dimension. The conditions under which the fractal dimension can be considered invariant feature metallographic images.

Keywords: metallographic image, fractal dimension, affine transformation.

Автоматизована обробка інформації, зокрема візуальної, дає змогу ефективно вирішувати наукові та прикладні завдання у різноманітних галузях. Зростання обсягів інформації призводить до