

## КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА КОМПОНЕНТИ

УДК 681.3:621.375

О.Д. АЗАРОВ, О.В.КАДУК, О.В.ДУДНИК, А.В.РОСОЦУК

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

### МЕТОДИ ЦИФРОВОГО КАЛІБРУВАННЯ ВІДМОВСТІЙКИХ ЦАП ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ

Анотация: Проаналізовано стратегії цифрового самокалібрування характеристики перетворення ЦАП із ваговою надлишковістю. Визначено критерій ефективності та оцінено ефективність різних стратегій самокалібрування ЦАП із ваговою надлишковістю. Надано рекомендації щодо побудови ЦАП із ваговою надлишковістю, що самокалібруються, побудованих на неточних елементах. Аннотация: Проанализированы стратегии цифровой самокалибровки характеристики преобразования ЦАП с весовой избыточностью. Определен критерий эффективности и оценена эффективность различных стратегий самокалибровки ЦАП с весовой избыточностью. Даны рекомендации по построению ЦАП с весовой избыточностью, которые самокалибруются, построенных на неточных элементах.

Abstract: The strategies of digital conversion selfcalibration characteristic DAC with weight redundancy are analyzed. The criterion of efficiency are defined and efficiency of various strategies selfcalibration DAC with weight redundancy are evaluated. The recommendations on the construction of the selfcalibration DAC with weight redundancy, which are based on inaccurate elements, are given.

**Ключові слова:** самокалібрування, цифро-аналогове перетворення, характеристика перетворення, вагова надлишковість.

#### Вступ

Використання методів цифрового самокалібрування дозволяє створювати високоточні ЦАП із ваговою надлишковістю (ВН), побудовані на неточних елементах. На теперішній час розроблено досить значне число стратегій цифрового самокалібрування ЦАП [1, 2, 3]. Водночас, вибір того чи іншого підходу при побудові перетворювача форми інформації (ПФІ) слід здійснювати з огляду на обчислювальну складність процедур самокалібрування, а також мінімізацію похибки, що коригується.

#### Актуальність

ЦАП паралельної структури [4] є складовою частиною АЦП і в значній мірі визначає похибку останнього. Застосування технологічних прийомів для забезпечення точності ЦАП в широкому діапазоні температур дозволяє створювати 12-розрядні ПФІ з фіксованим рівнем похибки на етапі виготовлення [5, 6].

Разом з тим, поява параметричних відмов аналогових вузлів ПФІ у процесі експлуатації через вплив чинників навколишнього середовища і старіння елементів призводить до невідповідності декларованої роздільної здатності реальному значенню похибки перетворення [7]. При цьому властивість багаторозрядних ЦАП, що самокалібруються, з ВН підтримувати похибку перетворення у заданих межах, незважаючи на змінення параметрів аналогових вузлів під дією чинників, що впливають, будемо називати параметричною відмовостійкістю ПФІ [7].

У науково-технічній літературі окремі стратегії цифрового самокалібрування ЦАП із ВН розглянуто переважно епізодично [2]. Проте систематизованого аналізу можливостей існуючої множини стратегій, який би дав можливість відібрати найефективнішу, наприклад, за критерієм мінімальної похибки, не проводилося. Тому тема статті є актуальною.

#### Мета

Метою досліджень є аналіз стратегій цифрового калібрування характеристики перетворення ЦАП із ВН, що дозволяють зменшити підсумкову похибку перетворення порівняно з первинним похибками елементної бази.

#### Постановка задач

1. Проаналізувати запропоновані стратегії цифрового самокалібрування характеристики перетворення ЦАП із ВН.
2. Оцінити ефективність вказаних стратегій за умови, що критерієм є зменшення підсумкової похибки перетворення після застосування процедури самокалібрування.
3. Надати рекомендації щодо структурної організації ЦАП із ВН, що самокалібруються.

#### Розв'язання задач

Внаслідок змінення умов навколишнього середовища, зокрема, температури, вологості, тиску та інших чинників, а також у процесі старіння параметри і характеристики аналогових вузлів ПФІ змінюються. Вказана особливість призводить до відхилення ваг розрядів ЦАП від їх номінальних значень та, як наслідок, порушення лінійності характеристики перетворення (ХП) ЦАП, що, зокрема, проявляється у появі на ній стрибкоподібності, зокрема, немонотонності.

Особливістю ЦАП із ВН, побудованого на неточних елементах, є нерозривність характеристики перетворення (рис. 1) та наявність зон перекриття [1], що дозволяє підвищувати точність ЦАП та підтримувати заданий рівень похибок перетворення за рахунок використання процедури калібрування

ваг розрядів виключно в цифровій формі без втрати швидкодії ПФІ. На рис. 1  $K_{BX}$  – цифровий еквівалент вхідного коду,  $A_{ВИХ}$  – вихідний аналоговий сигнал.

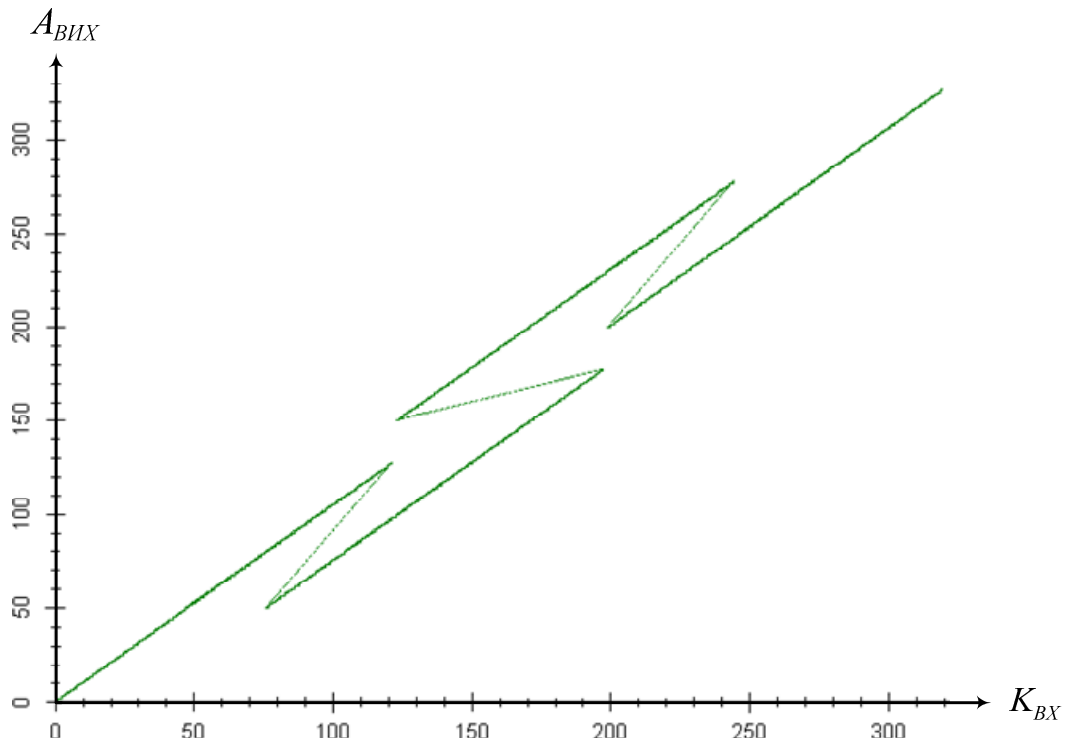


Рисунок 1 - Нерозривна характеристика перетворення ЦАП із ВН, побудованого на неточних елементах

Самокалібрування є різновидом коригування [5] і полягає у визначенні відхилень ваг старших «неточних» розрядів шляхом порівняння ваги поточного розряду, що калібрується, з сумою ваг певної групи сусідніх молодших розрядів на базі існуючих між ними математичних співвідношень з подальшим обчисленням коригувальних поправок або коригованих значень «неточних» розрядів [1].

В основу запропонованих стратегій самокалібрування покладено принцип умовного розбиття розрядної сітки перетворювача на групу «неточних» старших розрядів і «точних» молодших (рис. 2). При цьому практично всі ваги розрядів  $Q$  є неточними і можуть мати досить значний  $1 \div 10\%$  технологічний допуск  $\delta Q$ . У загальному випадку ця характеристика є ймовірнісною і, як правило, підпорядковується нормальному закону розподілу (рис. 3) [8], де  $f(x)$  – щільність імовірності значень  $\delta Q$ . При цьому  $\delta Q$  можна визначити таким чином:

$$\delta Q = \frac{\Delta Q_i}{Q_i},$$

де  $\Delta Q_i$  – абсолютне відхилення реальної ваги  $i$ -го розряду від свого номінального значення;  
 $Q_i$  – значення реальної ваги  $i$ -го розряду пристрою.

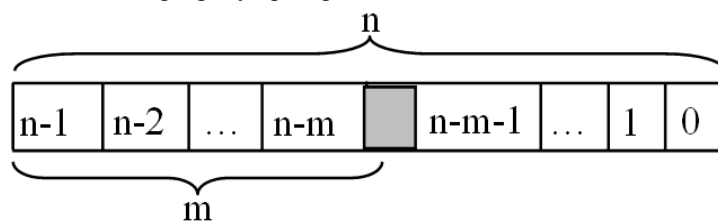
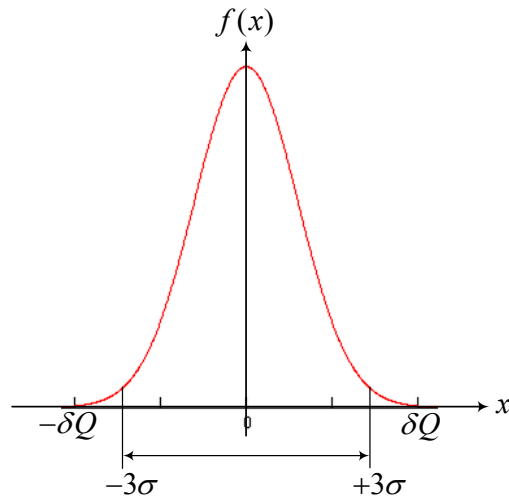


Рисунок 2 - Модель розрядної сітки ЦАП у режимі цифрового самокалібрування

Рисунок 3 - Щільність розподілу технологічного допуску  $\delta Q$ 

Указана особливість дає можливість використовувати спрощену технологію виготовлення аналогових вузлів і, зокрема, дозволяє відмовитися від лазерного припасування ваг розрядів ЦАП. Це забезпечує цілісність структури матеріалів елементів, їх стабільність і зменшення вартості [9].

При цьому ЦАП, що самокалібується, з ВН працює у двох режимах: основного перетворення та самокалібрування. Для реалізації самокалібрування структурна схема ЦАП повинна містити такі блоки:  $\alpha$ -ЦАП із ВН; схему порівняння (СП); регістр послідовного наближення (РПН); цифровий обчислювальний пристрій (ЦОП), що виконує необхідні обчислення; генератор калібрувального сигналу (ГКС); блок керування (БК); цифровий комутатор (ЦК); регістр (Рг); блоки постійної (БПП) й оперативної пам'яті (БОП) для зберігання двійкових кодів надлишкових ваг розрядів внутрішнього  $\alpha$ -ЦАП; аналоговий комутатор (Кл), що перемикає вихід основного  $\alpha$ -ЦАП на вихідну шину. Структурна схема ЦАП із ВН, що реалізує процедуру самокалібрування, показана на рис. 4.

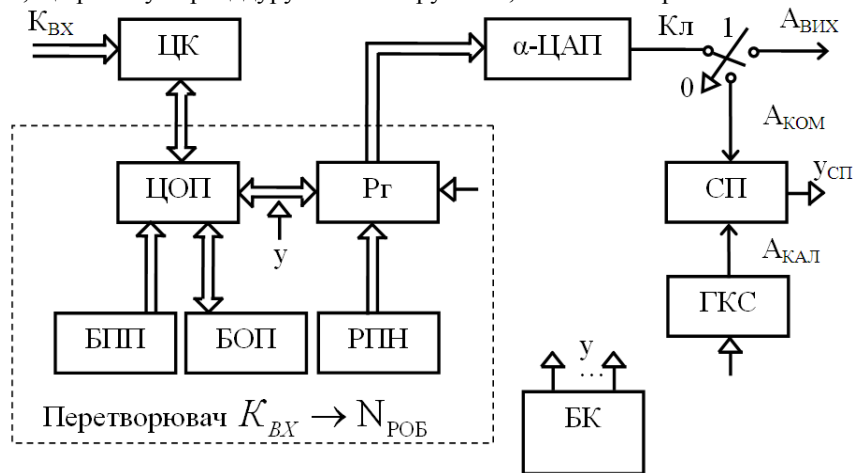


Рисунок 4 - Структурна схема ЦАП, що самокалібується, з ВН

Розглянемо роботу схеми (див. рис. 4) в режимі самокалібрування. Самокалібрування ваг розрядів ЦАП відповідно до стратегії одноциклового самокалібрування із завданням індивідуального рівня калібрувального сигналу, відповідну блок-схему якої показано на рис. 5, починається з першого неточного розряду  $Q_{n-m}$   $\alpha$ -ЦАП, абсолютне відхилення  $\Delta Q_{n-m}$  якого більше половини молодшого кванту  $Q_0$ , тобто  $\Delta Q_{n-m} \geq 0,5Q_0$ .

При цьому ГКС, схему якого показано на рис. 6 може являти собою інтегратор на базі операційного підсилювача. Тут  $I$  – джерело струму, ППС – підсилювач постійного струму,  $K$  – ключовий елемент,  $C$  – конденсатор. Для запуску інтегратора по команді БК замикається ключовий елемент  $K$  і струм зміщення заряджає конденсатор.

Коли ключовий елемент розмикається (це відбувається після спрацювання СП, що входить до структури ЦАП із ВН), заряд на конденсаторі фіксується і на виході інтегратора встановлюється постійний рівень сигналу, тобто

$$A_{КАЛ\ n-m} = Q_{n-m}$$

де  $Q_{n-m}$  – реальна вага  $(n-m)$ -го розряду ЦАП.

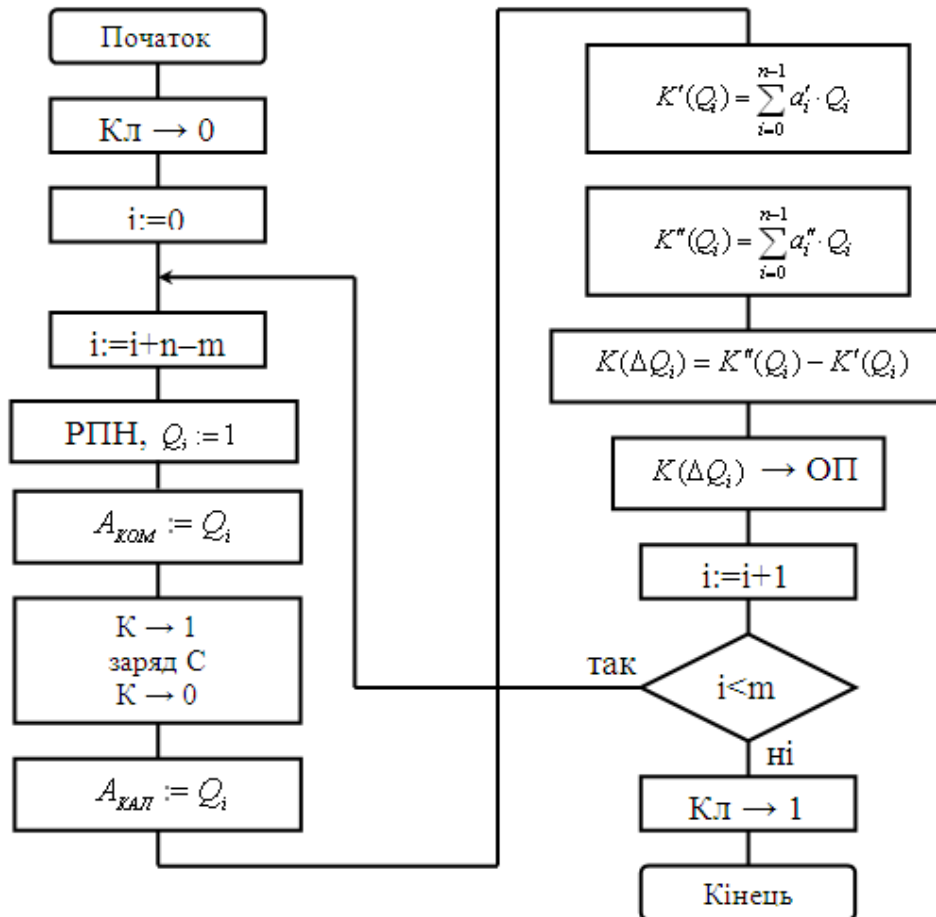


Рисунок 5 - Блок-схема алгоритму одноциклового самокалібрування ЦАП із ВН в режимі із завданням індивідуального рівня калібрувального сигналу

Після встановлення на одному вході СП аналогового сигналу  $A_{КАЛ}$  починається його подвійне врівноваження за алгоритмом послідовного наближення за допомогою РНП і  $\alpha$ -ЦАП із вмиканням та без вмикання розряду, що калібрується.

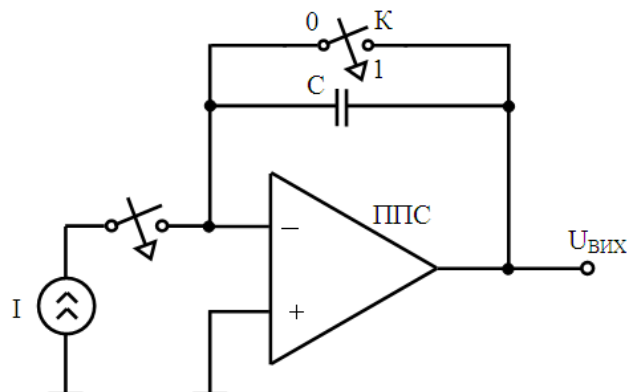


Рисунок 6 - Схема ГКС

При цьому, результат першого кодування  $A_{КАЛ}$  – код  $N'$ . Відповідний цифровий еквівалент  $K'(Q_{n-m})$  зберігається у блоці пам'яті ЦОП:

$$K'(Q_{n-m}) = \sum_{i=0}^{n-1} a'_i \cdot Q_i,$$

де  $a'_i$  – розрядні коефіцієнти, що відповідають коду  $N'$ .

Цифровий еквівалент коду другого врівноваження  $K''(Q_{n-m})$  зберігається в блоці пам'яті ЦОП:

$$K''(Q_{n-m}) = \sum_{i=0}^{n-1} a''_i \cdot Q_i.$$

Після формування  $K'(Q_{n-m})$  та  $K''(Q_{n-m})$  ЦОП знаходить код  $K(\Delta Q_{n-m})$  відхилення  $(n-m)$ -го розряду:

$$K(\Delta Q_{n-m}) = \sum_{i=0}^{n-1} a''_i \cdot Q_i - \sum_{i=0}^{n-1} a'_i \cdot Q_i,$$

що фіксується в блоці пам'яті ЦОП. На цьому калібрування  $(n-m)$ -го розряду закінчується.

Наступним калібрується  $(n-m+1)$ -й розряд. За допомогою ГКС формується  $A_{КАЛ} = Q_{n-m+1}$ . Далі проводиться подвійне врівноваження цього аналогового сигналу, причому під час другого врівноваження БК примусово забороняється вмикання  $(n-m+1)$ -го розряду. У результаті вказаних врівноважень в ЦОП формується два цифрових еквіваленти  $K'(Q_{n-m})$  і  $K''(Q_{n-m})$ , на основі яких знаходиться відхилення  $K(\Delta Q_{n-m+1})$ , що зберігається в блоці пам'яті ЦОП:

$$K(\Delta Q_{n-m+1}) = \sum_{i=0}^{n-1} a''_i \cdot Q_i - \sum_{i=0}^{n-1} a'_i \cdot Q_i.$$

Аналогічним чином проводиться знаходження кодів відхилень всіх  $m$  неточних розрядів  $\alpha$ -ЦАП із врахуванням поправок, що визначені на попередніх кроках.

Блок-схему алгоритму одноциклового самокалібрування ЦАП із ВН у режимі з довільним завданням калібрувального сигналу в рамках допуску  $\delta Q$  показано на рис. 7. При цьому ГКС може мати структуру, що показана на рис. 8. Тут  $\alpha$ -ЦАП<sub>КАЛ</sub> – калібрувальний цифро-аналоговий перетворювач, РПН<sub>КАЛ</sub> – калібрувальний регістр послідовного наближення. При цьому, додатковий калібрувальний  $\alpha$ -ЦАП<sub>КАЛ</sub> із ВН використовується для забезпечення встановлення потрібного значення вихідного калібрувального сигналу  $A_{КАЛ i}$  і нерозривності вихідної характеристики.

У цьому випадку калібрувальний сигнал формується, виходячи з такої умови (для  $\alpha=1,618$ ):

$$A_{КАЛ n-m} = \begin{cases} Q_{n-m}, & \text{якщо } Q_{n-m} > Q_{n-m-1} + Q_{n-m-2}; \\ Q_{n-m-1} + Q_{n-m-2}, & \text{якщо } Q_{n-m} \leq Q_{n-m-1} + Q_{n-m-2}. \end{cases}$$

Після встановлення калібрувального сигналу  $A_{КАЛ n-m}$  проводиться його подвійне врівноваження із вмиканням і без вмиканням  $(n-m)$ -го розряду і обчислюється код відхилення цього розряду. Після цього по команді БК відбувається перехід до самокалібрування наступного  $(n-m+1)$ -го розряду.

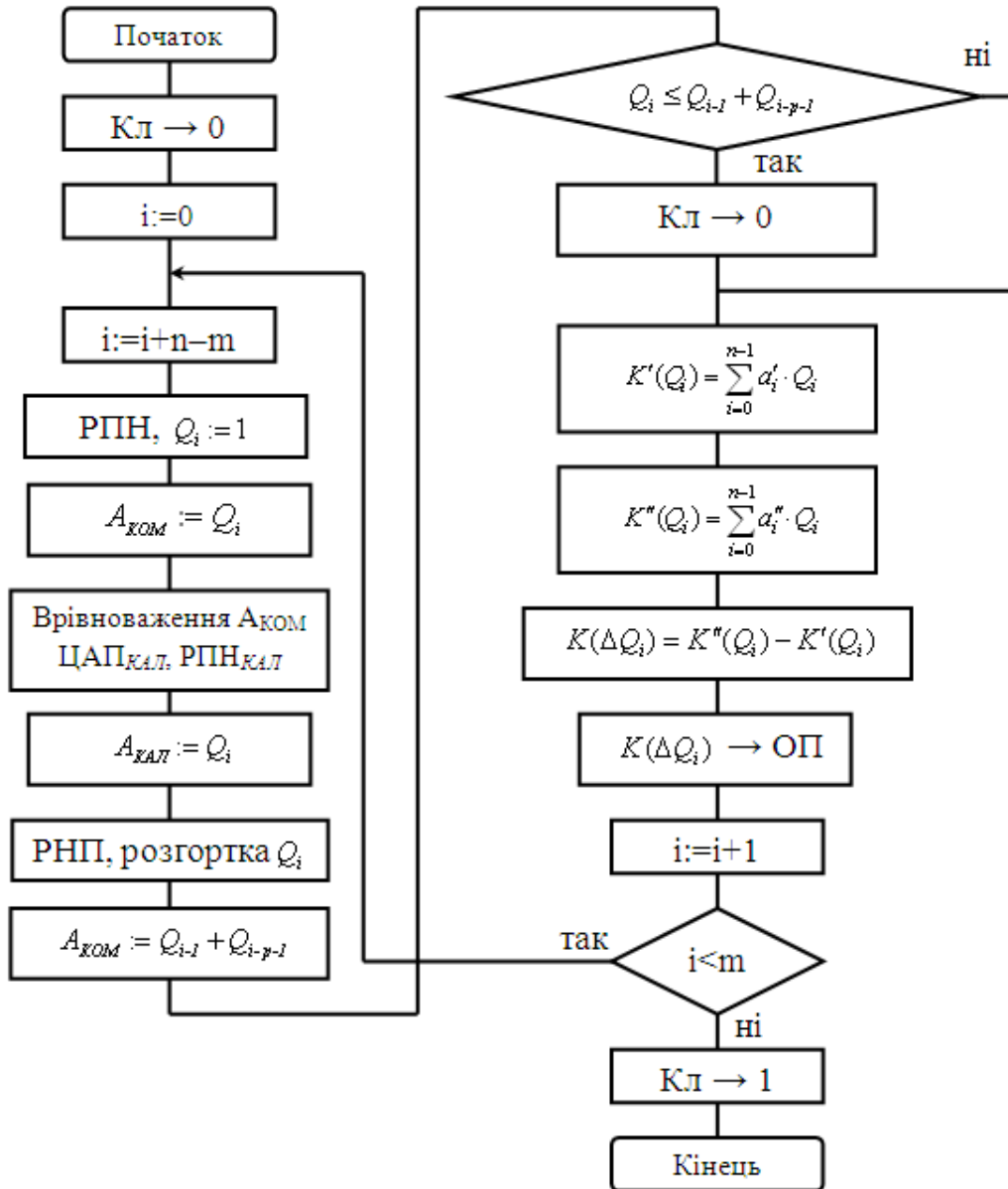


Рисунок 7 - Блок-схема алгоритму одноциклового самокалібрування ЦАП із ВН у режимі з довільним завданням калібрувального сигналу в рамках допуску  $\delta Q$

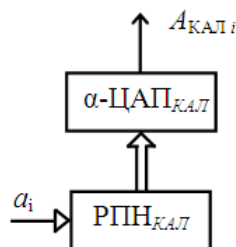


Рисунок 8 - Структурна схема ГКС

При організації процедури самокалібрування ЦАП згідно багаточислової стратегії з осередненням на розгортках (рис. 9) структурна схема ГКС також може мати вигляд, як показано на рис. 8. При цьому, по команді БК за допомогою РПН виконується ряд розгортки розряду, що калібрується. Далі відбувається визначення і встановлення відповідних калібрувальних сигналів за допомогою основних і калібрувальних ЦАП і РПН, а також ряд подвійних врівноважень. Після того у ЦОП на основі множини

отриманих коригувальних поправок визначається код відхилення  $i$ -го неточного розряду, що зберігається в пам'яті ЦОП.

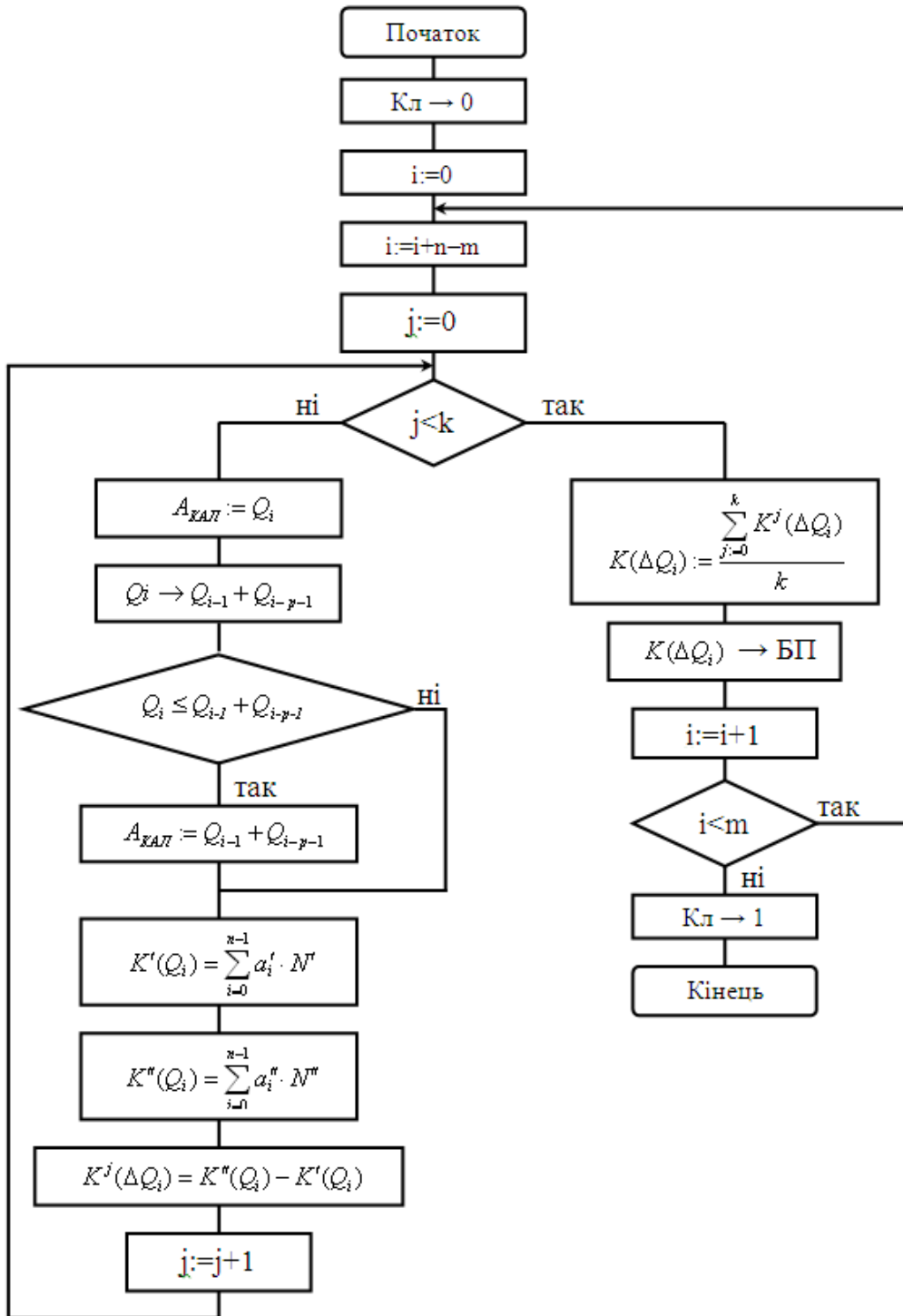


Рисунок 9 - Блок-схема алгоритму роботи ЦАП із ВН в режимі багатоциклового самокалібрування з осередненням на розгортках

Виконано комп'ютерне моделювання вищеписаних стратегій самокалібрування. Отримано графік розподілу щільності імовірності інтегральної нелінійності ХП по діапазону  $A_{ВНХ}$  для 15-ти розрядного ЦАП із  $\alpha=1,618$  з  $\delta Q=15\%$ . (рис. 10), а також графік розподілу щільності імовірності похибки лінійності ваг старших розрядів [1] такого ЦАП (рис. 11). Легко помітити, що після застосування самокалібрування похибка лінійності ваг розрядів та нелінійність ХП ЦАП значно

зменшується. На рис. 10, 11 крива *a* відповідає розподілу без застосування самокалібрування, а крива *b* – розподілу з застосуванням самокалібрування. Наведені дані підтверджують позитивний ефект застосування процедур самокалібрування.

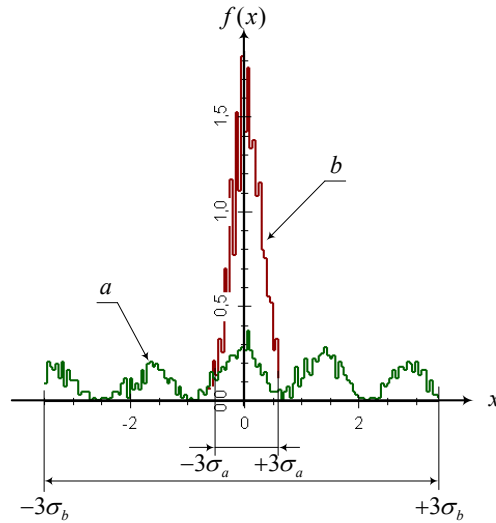


Рисунок 10 - Розподіл щільності імовірності інтегральної нелінійності по діапазону  $A_{ВНХ}$

У табл. 1, 2 наведено результати комп'ютерного моделювання ЦАП із ВН, що самокалібруються, на основі системи числення з  $\alpha=1,618$  та допуском на елементну базу  $\delta Q=15\%$ . При цьому С1, С2, С3 відповідають стратегіям одноциклового самокалібрування із завданням індивідуального рівня калібрувального сигналу, із довільним завданням калібрувального сигналу в рамках допуску  $\delta Q$  та багаточисловій стратегії з осередненням на розгортках відповідно.

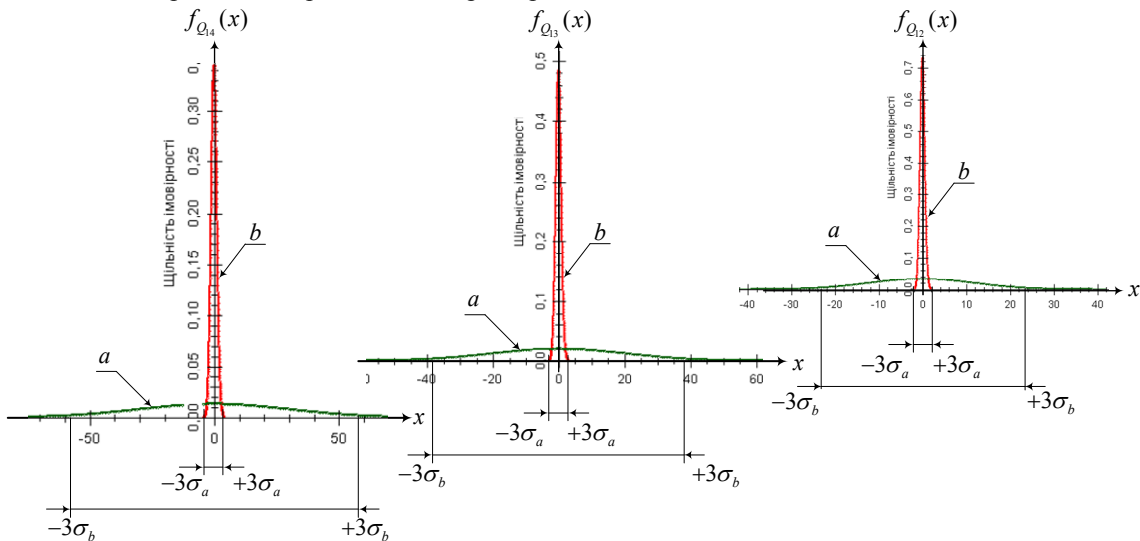


Рисунок 11 - Розподіл щільності імовірності похибки лінійності ваг розрядів

Для визначення закономірності зменшення похибки, що коригується, було обчислено значення інтегральної та диференціальної нелінійностей для 100 різних базисів ваг розрядів ЦАП із ВН. Після того було обчислено математичне сподівання та середньоквадратичне відхилення для вибірки за такими формулами:

$$M(\Delta\bar{Q}) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \Delta\bar{Q}_i,$$

де  $n$  – обсяг вибірки,  $\Delta\bar{Q}_i$  – значення похибки, що оцінюється, в  $i$ -й вибірці;



$$\sigma(\Delta\bar{Q}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} [\Delta\bar{Q}_i - M(\Delta\bar{Q})]^2}.$$

Таблиця 1 – Статистичні характеристики ІНЛ для різних стратегій самокалібрування ЦАП із ВН

Кількість розрядів $n_2(n_\alpha)$	M(ІНЛ)				σ(ІНЛ)			
	Без С.К.	С1	С2	С3	Без С.К.	С1	С2	С3
16 (23)	567,26	0,3417	0,3327	0,3970	419,12	0,2034	0,1923	0,1751
14 (20)	158,37	0,3228	0,3548	0,4364	112,49	0,2053	0,2048	0,2184
12 (18)	53,437	0,2813	0,3190	0,4066	36,999	0,1927	0,2001	0,1912

Таблиця 2 – Статистичні характеристики ДНЛ для різних стратегій самокалібрування ЦАП із ВН

Кількість розрядів $n_2(n_\alpha)$	M(ДНЛ)				σ(ДНЛ)			
	Без С.К.	С1	С2	С3	Без С.К.	С1	С2	С3
16 (23)	1221,8	2,6998	2,6463	2,6525	760,07	0,1100	0,0770	0,0787
14 (20)	292,21	2,6917	2,6368	2,6225	167,84	0,1118	0,0643	0,0176
12 (18)	98,499	2,6534	2,6274	2,6372	61,720	0,0846	0,0464	0,0619

Критерієм ефективності усіх стратегій самокалібрування ЦАП є зменшення абсолютної похибки перетворення ПФІ після проведення самокалібрування. Так, абсолютне значення похибки перетворення до проведення процедури цифрового самокалібрування ЦАП можна визначити як:

$$A_{ВИХ} = A_{ВИХ id} + \Delta_{\Sigma},$$

де  $A_{ВИХ id}$  – це аналоговий еквівалент вхідного цифрового сигналу при відсутності похибок у каналі перетворення,  $\Delta_{\Sigma}$  – загальна похибка наскрізного каналу ЦА-перетворення, що визначається як [3]:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{\Sigma PKC}^2 + \Delta_{\Sigma AK}^2 + \Delta_{\Sigma B}^2 + \Delta_{\Sigma ПСН}^2}.$$

Після проведення процедури цифрового самокалібрування ЦАП абсолютне значення похибки перетворення можна визначити як:

$$A_{ВИХ СК} = A_{ВИХ id} + \Delta_{\Sigma СК}.$$

де  $\Delta_{\Sigma СК}$  – похибка наскрізного каналу ЦА-перетворення після проведення самокалібрування, що визначається як [3]:

$$\Delta_{\Sigma СК} = \sqrt{\Delta_{ДНЛ МСК}^2 + \Delta_{ІНЛ МСК}^2 + \Delta_{М МСК}^2 + \Delta_{КВ ЦАП}^2 + \Delta_{РОЗ}^2}.$$

Ефективність застосування процедури цифрового самокалібрування можна визначити як відношення абсолютної похибки перетворення до і після процедури самокалібрування:

$$E = \frac{\Delta A_{ВИХ}}{\Delta A_{ВИХ СК}} = \frac{(A_{ВИХ id} + \Delta_{\Sigma}) - A_{ВИХ id}}{(A_{ВИХ id} + \Delta_{\Sigma СК}) - A_{ВИХ id}} = \frac{\Delta_{\Sigma}}{\Delta_{\Sigma СК}}.$$

У табл. 3 наведено оцінки ефективності різних стратегій самокалібрування ЦАП із ВН, розраховані на основі значень математичного сподівання ІНЛ та ДНЛ із табл. 1 та табл. 2.

Таблиця 3 – Ефективність стратегій самокалібрування ЦАП із ВН

Кількість розрядів $n_2(n_a)$	E(ІНЛ)			E(ДНЛ)		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
16 (23)	1660,1	1705	1428,9	452,55	461,7	460,62
14 (20)	490,61	446,36	362,9	108,55	110,82	111,42
12 (18)	189,96	167,51	131,42	37,12	37,489	37,35

Аналіз наведених даних показує, що ефективність самокалібрування ЦАП із ВН зростає в міру зростання кількості розрядів ЦАП та залежить від обраної стратегії самокалібрування.

#### Висновки

1. Проаналізовано стратегії цифрового самокалібрування характеристики перетворення ЦАП із ВН. Доведено, що використання цифрового самокалібрування ХП дозволяє істотно (на 1÷2 порядки) зменшити похибки ХП порівняно з похибками первинної елементної бази, а це дозволяє будувати високоточні ЦАП, побудовані на спрощеній елементній базі.

2. Визначено критерій ефективності та оцінено ефективність різних стратегій самокалібрування ЦАП із ВН. Показано, що ефективність самокалібрування вказаних пристроїв зростає в міру зростання розрядності ЦАП із ВН, а також при зниженні вимог на розкид параметрів елементної бази та залежить від обраної стратегії самокалібрування.

3. Надано рекомендації щодо побудови ЦАП із ВН, що самокалібруються, побудованих на неточних елементах. Похибка перетворення таких ЦАП відповідає заданим значенням і практично не залежить від параметрів навколишнього середовища.

#### Література

1. Азаров О. Д. Багаторозрядні АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю, стійкі до параметричних відмов. Монографія / О.Д. Азаров, О.В. Кадук. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – 150 с.
2. Захарченко С. М. Самокалібровані АЦП із накопиченням заряду на основі надлишкових позиційних систем числення : монографія / Захарченко С. М., Азаров О. Д., Харков О. М.; під заг. ред О. Д. Азарова. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 235 с.
3. Азаров О.Д. Кориговані і некориговані похибки багаторозрядних ПФІ, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю / О.Д. Азаров, О.В. Кадук, О.В. Дудник //Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології, – 2009.– №2. С. 99 – 110.
4. Гнатек Ю. Р. Справочник по цифроаналоговым и аналогоцифровым преобразователям / Гнатек Ю. Р. – М. : Радио и связь, 1982. – 552 с
5. Грушвицкий Р. И. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем / Р. И. Грушвицкий, А. Х. Мурсаев, В. Б. Смолов. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 160 с. – ISBN 5-283-04450-5.
6. Rombouts P. Comments on «Interstage Gain-Proration Technique for Digital-Domain Multistep ADC Calibration» / Rombouts P., Weyten L. // IEEE Trans. Circuit Syst. II. – August 1999. – Vol. CAS-46. – P. 1114-1116.
7. Hans Camenzind. Designing Analog Chips / Hans Camenzind. – 2005. – p. 242.
8. Азаров О. Д. Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі надлишкових систем числення з ваговою надлишковістю. Монографія / О.Д. Азаров. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – 232 с.

Стаття надійшла до редакції 1.02.2011.

#### Відомості про авторів

**Азаров Олексій Дмитрович** – д.т.н., професор, завідувач кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**Кадук Олександр Володимирович** – к.т.н., ст. викладач кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**Дудник Олександр Вікторович** – аспірант кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**Росошук Анастасія Володимирівна** – студентка кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.