

Азаров О.Д., д-р техн. наук
Кадук О.В.,
Дудник О.В.,
Муращенко О.Г.

ПРЯМЕ І ЗВОРОТНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ «РОБОЧИЙ КОД – ЦИФРОВИЙ ЕКВІВАЛЕНТ» В АЦП І ЦАП, ЩО САМОКАЛІБРУЮТЬСЯ, З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ

Вінницький національний технічний університет

Проаналізовано методи перетворення «вхідна аналогова величина – компенсуюча аналогова величина – робочий код – цифровий еквівалент (ЦЕ)», а також «ЦЕ – робочий код – аналогова величина» відповідно в АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю. Розглянуто підходи щодо структурно-алгоритмічної організації прямого і зворотного перетворення «робочий код – ЦЕ» для швидкодіючих АЦП і ЦАП, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю. Надано рекомендації з проектування обчислювальних перетворювачів послідовного наближення «робочий код – ЦЕ» та зворотної процедури для АЦП і ЦАП, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю

Вступ

Аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі відносяться до класу перетворювачів форми інформації (ПФІ), що широко застосовуються в різних галузях людської діяльності, а саме: багатоканальних системах збору даних, апаратурі для контролю систем теле- і радіомовлення, для сейсмозрозвідки та ін. [1, 2]. Використання вагової надлишковості та самокалібрування дозволяє створювати високоточні АЦП і ЦАП, побудовані на неточних елементах [3, 4]. До того ж такий підхід дає можливість значно скоротити час перетворення і підвищити швидкодію за рахунок компенсації динамічних похибок першого і другого роду [4]. Водночас, у всіх ПФІ з ваговою надлишковістю по суті використовуються три системи числення (СЧ): базова СЧ із ваговою надлишковістю (СЧВН), робоча СЧВН і зовнішня СЧ, що переважно є двійковою.

Актуальність

У багаторозрядних швидкодіючих АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю, побудованих на неточних і нестабільних аналогових вузлах, у процесі експлуатації для підтримки необхідного рівня точності

використовується процедура самокалібрування [3 - 5].

Водночас, під час використання СЧВН виникає дві задачі: перетворення робочого коду в його цифровий еквівалент для АЦП та перетворення цифрового еквіваленту в робочий код для ЦАП.

У науково-технічній літературі методи прямого і зворотного перетворення «базова СЧВН – двійкова СЧ» розглянуто переважно епізодично [4, 6], а методи прямого і зворотного перетворення «робочий код – ЦЕ» у ПФІ з ваговою надлишковістю не розглянуто взагалі. До того ж, відсутній єдиний систематизований підхід щодо побудови обчислювальних перетворювачів, що реалізують пряме і зворотне перетворення «робочий код – ЦЕ». Тому тема статті, що присвячена дослідженню методів прямого і зворотного перетворення «робочий код – ЦЕ» в АЦП і ЦАП, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю, є актуальною.

Мета

Метою статті є аналіз методів прямого і зворотного перетворення «робочий код – ЦЕ» в АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю, а також надання інженерних рекомендацій з проектування пристроїв, що їх реалізують.

Постановка задач

1. Аналіз запропонованих методів перетворення «аналогова величина – компенсуюча аналогова величина – робочий код – ЦЕ», а також «ЦЕ – робочий код – аналогова величина» відповідно в АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю.

2. Розгляд підходів щодо структурно-алгоритмічної організації прямого і зворотного перетворення «робочий код – ЦЕ» для ПФІ з ваговою надлишковістю.

3. Надання рекомендацій з проектування обчислювальних перетворювачів послідовного наближення «робочий код – ЦЕ» для АЦП та зворотної процедури для ЦАП, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю.

Розв'язання задач

У СЧВН будь-яке ціле число D можна зобразити з певною точністю у вигляді:

$$D = \sum_0^{n_\alpha-1} a_i \cdot \alpha^i,$$

де $a_i \in \{0,1\}; \{\bar{1},1\}$ – розрядні коефіцієнти; α – основа СЧ, що дорівнює відношенню ваг сусідніх розрядів, при їх природньому базисі; i – номер розряду; n_α – число розрядів СЧВН за умови рівності діапазонів зображень чисел [4].

Розглянемо типи СЧВН, що використовуються у ПФІ з ваговою надлишковістю. Відзначимо, що базова СЧВН – це така, природним базисом якої є набір ваг розрядів, значення яких точно дорівнюють номінальним вагам розрядів, а саме:

$$\alpha^0, \alpha^1, \alpha^2, \dots, \alpha^{n_\alpha-1}.$$

Прикладами базових СЧВН є такі, в яких застосовуються α зі значеннями, наприклад, $\alpha = \sqrt{2}$ або у вигляді відношення Коца, або на базі золотих p і s пропорцій [4, 6, 7]. Для відношення Коца $\alpha \approx 1,84$, що є розв'язком харак-

теристичного рівняння $x^3 - x^2 - x - 1 = 0$. Варто відзначити, що у СЧВН із зазначеними α ваги розрядів є ірраціональними числами. Прикладом базисів таких СЧ є такі числові послідовності:

$$1; \sqrt{2}; 2; 2\sqrt{2}; 4; 4\sqrt{2}; 8; 8\sqrt{2}; \dots; \sqrt{2}^{n-2}; \sqrt{2}^{n-1},$$

для $\alpha = \sqrt{2}$ та

$$1; \left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^1; \left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^2; \dots; \left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^{n-2}; \left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^{n-1},$$

для $\alpha = \left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)$.

Робоча СЧВН – це така, що фізично існує в реальних АЦП і ЦАП, побудованих на основі базової СЧВН. Базисом такої СЧ є набір ваг розрядів, значення яких відхиляються від номінальних випадковим чином у рамках допуску на виготовлення δQ_d . Причому для природного базису реальна вага i -го розряду ПФІ дорівнює:

$$Q_i = \alpha^i Q_0 + \Delta Q_i,$$

де Q_i – значення аналогової величини (струму або напруги), що відображає реальну вагу i -го розряду пристрою; ΔQ_i – відхилення реальної ваги i -го розряду від свого номінального значення, що визначається як:

$$\Delta Q_i = \delta Q \cdot Q_i,$$

де δQ – відносна похибка задання ваги; Q_0 – вага молодшого розряду, причому:

$$Q_0 = \theta \cdot \alpha^0,$$

де θ – коефіцієнт пропорційності між значенням ваги розряду СЧ та значенням фізичної величини ваги розряду.

Водночас слід зазначити, що порозрядне АЦ-перетворення на основі СЧВН є специфічним і дещо відрізняється від аналогічної процедури для двійкової СЧ. Відмінністю при цьому є наявність проміжного перетворення робочого коду в цифровий еквівалент. Узагальнена операторна схема АЦ-перетворення з ваговою надлишковістю може бути представлена таким чином:

$$A_{BX} \rightarrow A_K \rightarrow N_P \rightarrow K_{ВИХ}(A_K), \quad (1)$$

де A_{BX} – це вхідний аналоговий сигнал; A_K – компенсуючий аналоговий сигнал, що формується у ході порозрядного врівноваження, причому:

$$A_K = \sum_0^{n_{\alpha}-1} a_i Q_i;$$

$N_P \in \{a_{n_{\alpha}-1}, \dots, a_1, a_0\}$ – робочий код; $K_{ВИХ}(A_K)$ – цифровий еквівалент компенсуючого аналогового сигналу, що визначається як:

$$K_{ВИХ} = \sum_0^{n_{\alpha}-1} a_i K(Q_i), \quad (2)$$

де $K(Q_i)$ – цифровий еквівалент двійкового коду реальної ваги i -го розряду ПФІ.

Узагальнена структурна схема пристрою, що працює відповідно до операторної схеми (1), зображена на рис. 1. Тут СП – схема порівняння, α -ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач із ваговою надлишковістю, ОПР – обчислювальний перетворювач $N_P \rightarrow K_{ВИХ}$, РПН – реєстр послідовного наближення, БК – блок керування, ЦОП – цифровий обчислювальний пристрій, y_1, \dots, y_n – керуючі сигнали, $y_{СП}$ – цифровий сигнал з виходу СП. При цьому перетворювач $N_P \rightarrow K_{ВИХ}$ може бути побудований за узагальненою структурною схемою, яку наведено на рис. 1 б.

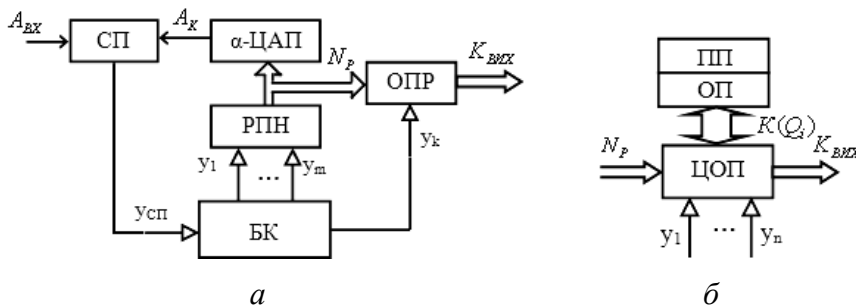


Рис. 1. АЦП порозрядного наближення з ваговою надлишковістю:
а) узагальнена структурна схема;
б) обчислювальний перетворювач $N_P \rightarrow K_{ВИХ}$

Варто відзначити, що для визначення $K(Q_i)$ у ПФІ з ваговою надлишковістю застосовують процедуру самокалібрування. В основу самокалібрування покладено принцип умовного розбиття розрядної сітки перетворювача на групу з m «неточних» старших розрядів і $(n-m)$ «точних» молодших, залежно від рівня допуску δQ_D . Визначення $K(Q_i)$ починається з $(n-m)$ -го молодшого з неточних розрядів і базується на врівноваженні допоміжного

сигналу $A_{КЛi}$ із вмиканням і без вмикання i -го розряду. Детально процедури самокалібрування розкриті в роботах [3-5, 8]. Визначені ЦЕ зберігаються в пам'яті перетворювача, що може бути організована так, як показано на рис. 2. ПП та ОП – це відповідно постійна та оперативна пам'ять, де зберігаються ЦЕ кодів номінальних та реальних ваг розрядів. Блок схему алгоритму прямого перетворення $A_{BX} \rightarrow A_K \rightarrow N_P \rightarrow K_{ВИХ}(A_K)$ наведено на рис. 3.

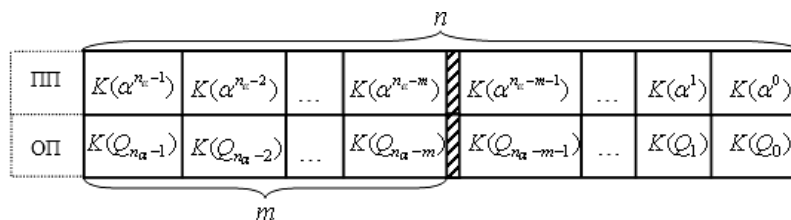


Рис. 2. Схема організації комірок пам'яті у ПФІ з ваговою надлишковістю

Проаналізувавши викладене, визначимо функції, що їх повинен виконувати перетворювач $N_p \rightarrow K_{ВИХ}$:

- зчитування з пам'яті ЦЕ кодів реальних ваг розрядів;
- збереження проміжних результатів обчислень;
- циклічне підсумовування проміжних результатів обчислювань;
- збереження результату формування N_p .

На основі аналізу вищенаведених функцій визначимо перелік цифрових вузлів і структур, що необхідні для реалізації вказаного пристрою:

- блок пам'яті;
- БК для організації функціонування ПФІ;
- цифровий комутатор;
- нагромаджувальний суматор;
- регістр пам'яті.

Структурну схему обчислювального перетворювача порозрядного наближення $N_p \rightarrow K_{ВИХ}$, що складається з таких вузлів, показано на рис. 4. Тут ЦК – цифровий комутатор, БК – блок керування, См – нагромаджувальний суматор, РгР – регістр результату. При цьому ОП має n_α комі-

рок для зберігання $K(Q_i)$. Розрядність вихідного двійкового коду $K_{ВИХ}$ дорівнює n_2 , причому:

$$n_2 = \left\lceil n_\alpha \cdot \frac{\ln \alpha}{\ln 2} \right\rceil,$$

де $\lceil \cdot \rceil$ – округлення до більшого цілого.

У процесі основного перетворення врівноваження вхідного аналогового сигналу $A_{ВХ}$ компенсуючим A_K здійснюється за допомогою СП, РПН і власне α -ЦАП. У РПН за результатами спрацювання СП формується код N_p і послідовно подається у ЦОП. ЦОП містить См і РгР. Якщо $a_i = 1$, то по команді БК з ОП у См переписується $K(Q_i)$. Нуль у розряді N_p не змінює значення в См. Причому цифровий еквівалент вхідного аналогового сигналу знаходиться згідно виразу (2).

Варто відзначити, що в АЦП послідовного наближення порозрядне врівноваження здійснюється паралельно і одночасно з обчисленням $K_{ВИХ}$. Фактично по завершенню врівноваження закінчується і перетворення $N_p \rightarrow K_{ВИХ}$.

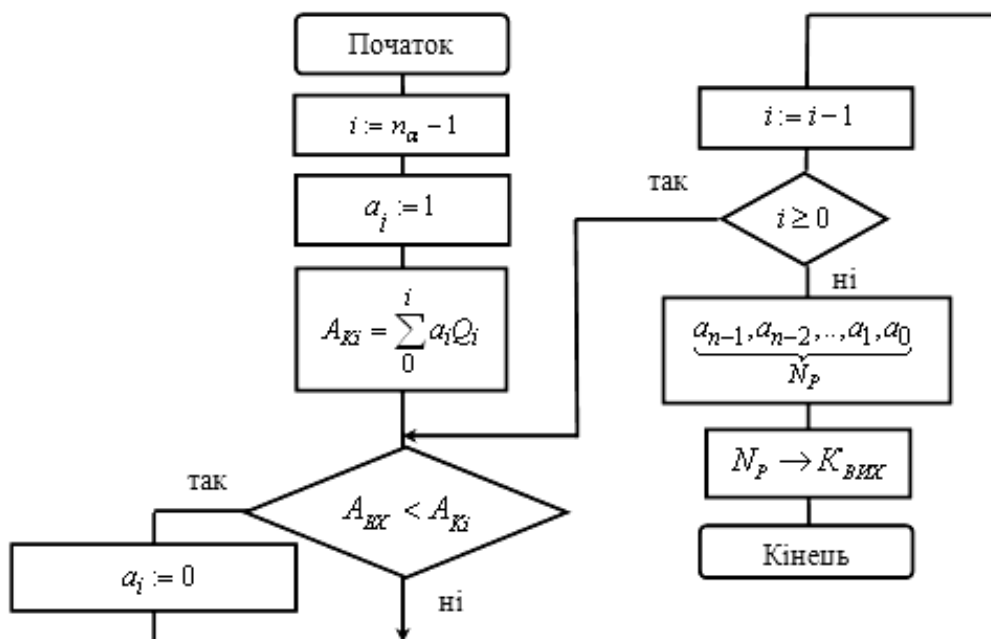


Рис. 3. Блок-схема алгоритму функціонування АЦП порозрядного наближення з ваговою надлишковістю

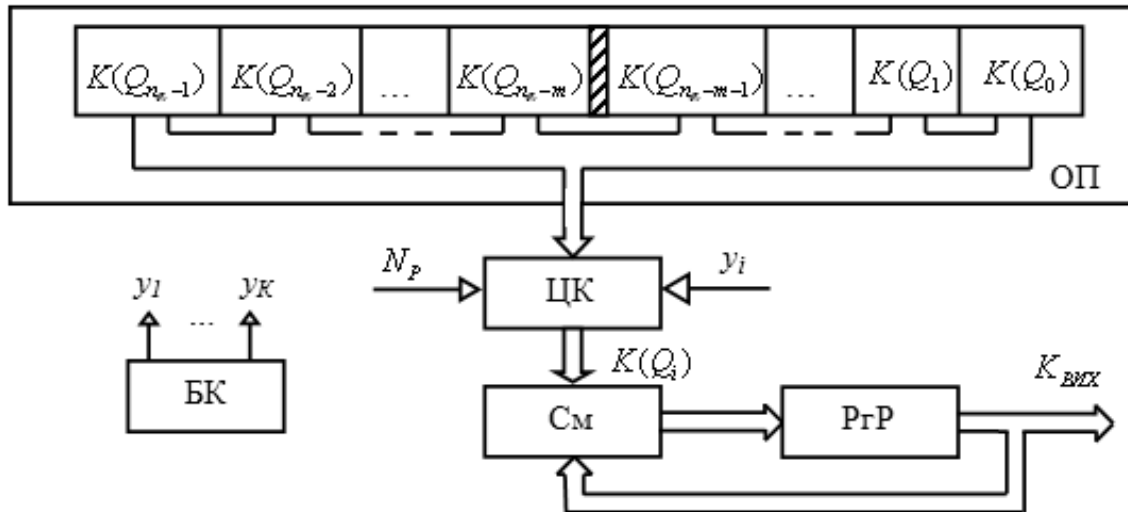


Рис. 4. Пристрій обчислення K_{BHX} для АЦП порозрядного наближення з ваговою надлишковістю

Узагальнена операторна схема ЦА-перетворення може бути представлена таким чином:

$$K_{BX} \rightarrow N_p \rightarrow A_{BHX},$$

де A_{BHX} – це вихідний аналоговий сигнал, K_{BX} – ЦЕ вхідного двійкового коду.

Структурну схему пристрою, що виконує вказане перетворення, наведено на рис. 5. Перетворювач $K_{BX} \rightarrow N_p$ може бути реалізовано згідно структури, яку наведено на рис. 5 б.

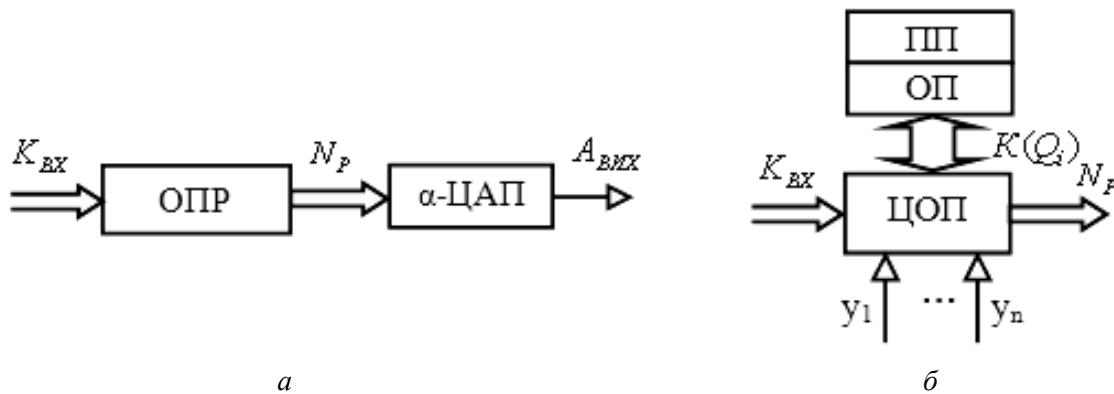


Рис. 5. ЦАП із ваговою надлишковістю:
 а) узагальнена структурна схема;
 б) обчислювальний перетворювач $K_{BX} \rightarrow N_p$

Зазначений перетворювач крім функцій зчитування з пам'яті кодових комбінацій, збереження проміжних і кінцевих результатів перетворення та підсумовування повинен ще мати можливість збереження вхідного ЦЕ та виконання операції цифрового порівняння. Тому в даному випадку, крім ОП, ЦК, БК, СМ, РГР, знадобиться ще:

- реєстр (для збереження вхідних даних);
- цифровий компаратор.

Узагальнену структурну схему обчислювального перетворювача порозрядного наближення $K_{BX} \rightarrow N_p$ для ЦАП із ваговою надлишковістю показано на рис. 6. Тут ЦСП – цифрова схема порівняння, Рг – реєстр. Перетворення K_{BX} у

N_p здійснюється за n_α тактів шляхом послідовного порозрядного наближення за принципом «цифра-за-цифрою», а саме: старшими розрядами вперед. На першому кроці по команді БК K_{BX} подається в регістр Рг. Далі за допомогою ЦК із пам'яті вибираються $K(Q_i)$. У См відбувається віднімання значення $K(Q_i)$ від K_{BX} , що знаходиться в Рг. На основі аналізу результату операції віднімання на ЦСП у РгР формуються розрядні коефіцієнти

робочого коду a_i (рис. 7), а в Рг відбувається запис значення результату операції віднімання, причому:

$$\Delta K_i = K_{BX} - \sum_{j=i}^{n_\alpha} a_j \cdot K(Q_j). \quad (3).$$

При цьому значення розрядних коефіцієнтів задовольняють умові:

$$a_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \Delta K_i \geq 0; \\ 0, & \text{якщо } \Delta K_i < 0. \end{cases}$$

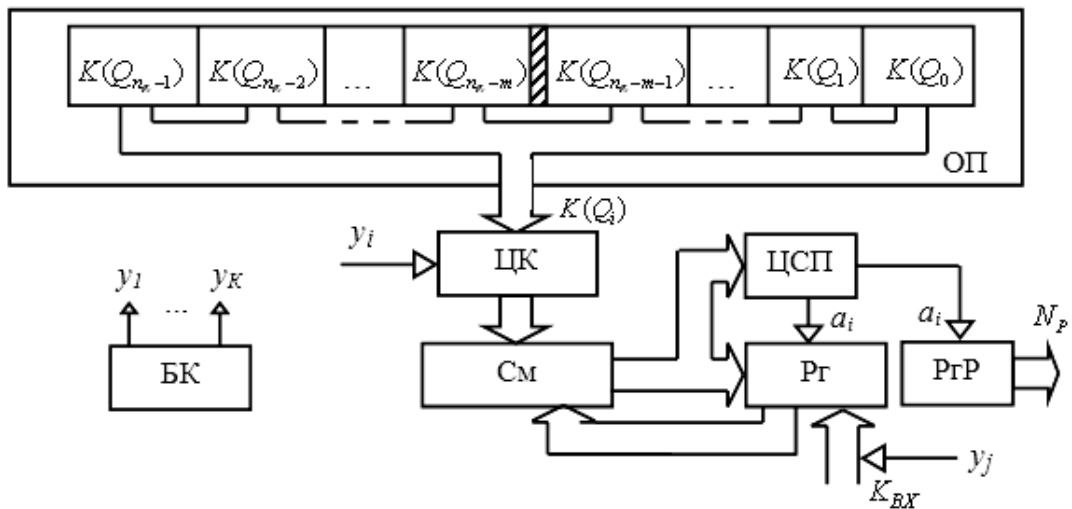


Рис. 6. Пристрій формування робочого коду N_p у ЦАП із ваговою надлишковістю

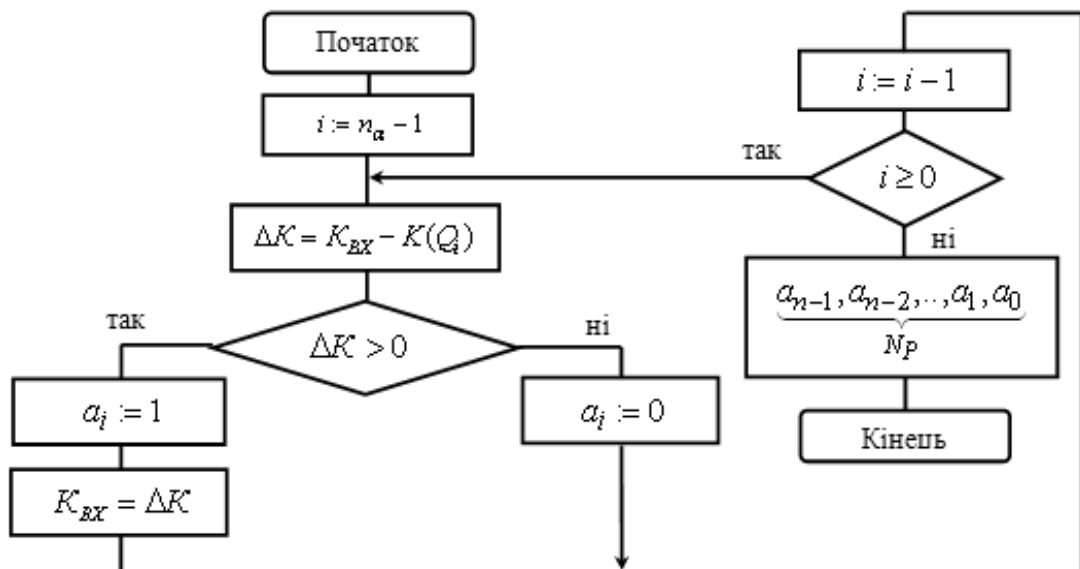


Рис. 7. Блок-схема алгоритму формування N_p

Наведемо приклад виконання перетворення $K_{BX} \rightarrow N_p$, причому $K_{BX} \in \{a_{n-1}, \dots, a_1, a_0\}$,

$N_p \in \{a_{n_\alpha-1}, \dots, a_1, a_0\}$. Нехай цифрові еквіваленти реальних ваг розрядів ЦАП (розряд-

ність $n_\alpha = 12$; $\alpha = 1,618$; $\delta Q_D = 5\%$) мають значення, наведені в табл. 1. Цифровий еквівалент вхідної величини ЦАП чисельно дорівнює $K_{BX} = 170$, що відповідає кодовій комбінації у двійковій СЧ 10101010. Згідно алгоритму (рис. 7) на першому кроці вхідна величина порівнюється з цифровим еквівалентом старшого розряду (вираз (3)). Маємо

$$\Delta K_{11} = K_{BX} - K(Q_{11}) =$$

$= 170 - 197,4 = -27,4$. Оскільки $\Delta K_{11} < 0$, то на виході ЦСП формується старший розрядний коефіцієнт N_p $a_{11} = 0$. На наступному кроці маємо $\Delta K_{10} = K_{BX} - K(Q_{10}) = 170 - 122 = 48 > 0$, тому $a_{10} = 1$, а $K_{BX} = \Delta K_{10} = 48$. Аналогічним чином виконується визначення всіх a_i , причому $\Delta K_1 = 1,4 - 1,6 = -0,2 < 0$, $a_1 = 0$, $\Delta K_0 = 1,4 - 1,0 = 0,4 > 0$, $a_0 = 1$.

Таблиця 1. Цифрові еквіваленти реальних ваг розрядів ЦАП на основі СЧВН з $\alpha = 1,618$

№ розряду	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
$K(Q_i)$	197,4	122	75,4	46,6	28,8	17,8	11,0	6,8	4,2	2,6	1,6	1,0

Значення робочого коду вигляду $N_p \in \{a_{n_\alpha-1}, \dots, a_1, a_0\}$ на кожному кроці наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Значення робочого коду N_p

№ кроку	N_p
1	0x xx xx xx xx xx
2	01 xx xx xx xx xx
3	01 0x xx xx xx xx
4	01 01 xx xx xx xx
5	01 01 0x xx xx xx
6	01 01 00 xx xx xx
7	01 01 00 0x xx xx
8	01 01 00 00 xx xx
9	01 01 00 00 0x xx
10	01 01 00 00 00 xx
11	01 01 00 00 00 0x
12	01 01 00 00 00 01

Отже, як підсумок отримуємо робочий код вигляду $N_p = 010100000001$. Аналогічним чином здійснюються і всі інші перетворення $K_{BX} \rightarrow N_p$.

Оцінимо потенційну швидкодію запропонованих пристроїв, прийнявши, що час виконання операції порівняння кодів дорівнює $t_{СП}$, час виконання операції додавання (віднімання) – $t_{СУМ}$, зчитування кодів з пам'яті відбувається за час $t_{ЗЧИТ}$. Тоді процедура прямого перетворення «робочий код – ЦЕ» у ПФІ з ваговою над-

лишковістю виконуватиметься за такий час:

$$T_{АЦ} = h \cdot (t_{ЗЧИТ} + t_{СУМ}),$$

де h – кількість значущих розрядів кодової комбінації. Час виконання процедури зворотного перетворення «робочий код – ЦЕ» у ПФІ з ваговою надлишковістю можна оцінювати за допомогою такого виразу:

$$T_{ЦА} = n_\alpha \cdot (t_{ЗЧИТ} + t_{СП}) + h \cdot t_{СУМ}.$$

Варто відзначити, що серійні 18-ти розрядні моделі АЦП фірми *Analog Devices* мають час перетворення на рівні $5 \div 10$ мкс, тривалістю такту $200 \div 500$ нс [10]. При цьому варто відмітити, що цикл прямого перетворення «робочий код – ЦЕ» набагато менший часу врівноваження аналогового сигналу, а тому практично не впливає на загальний час перетворення.

Висновки

1. Проаналізовано запропоновані методи перетворення «вхідна аналогова величина – компенсуюча аналогова величина – робочий код – ЦЕ», а також «ЦЕ – робочий код – аналогова величина» відповідно в АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю. Показано, що обчислення $K_{ВЛХ}$ не зменшує швидкодію вказаного АЦП, оскільки здійснюється одночасно і послі-

довно такт за тактом з порозрядним АЦ-ривноваженням.

2. Розглянуто підходи щодо структурно-алгоритмічної організації прямого і зворотного перетворення «робочий код – ЦЕ» для швидкодіючих АЦП і ЦАП, що самокалібруються, із ваговою надлишковістю. Показано, що реалізація вказаних перетворень здійснюється з використанням відомих обчислювальних вузлів, що працюють у двійковій системі числення. Це не вимагає побудови оригінальної елементної бази і дозволяє застосовувати серійні цифрові мікросхеми.

3. Надано рекомендації з проектування обчислювальних перетворювачів послідовного наближення «робочий код – ЦЕ» та зворотної процедури для ПФІ, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю. Доведено, що для АЦП наявність ЦОП, що виконує функції перетворення кодів, практично не впливає на загальний час перетворення.

Список літератури

1. *Уолт Кестер*. Аналого-цифровое преобразование / пер. с англ. Володина Е. Б. – М.: «Техносфера», 2007. – 1019 с.

2. *Грушвицкий Р. И. Мурсаев А. Х., Смолв В. Б.* Аналого-цифровые периферийные устройства микро-процессорных систем. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 160 с.

3. *Кадук О. В.* Відмовостійкі багаторозрядні АЦП і ЦАП, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.05 / О. В. Кадук. – Вінниця, 2010. – 16 с.

4. *Азаров О. Д.* Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, Вінниця, 2004. – 260 с.

5. *Азаров О. Д., Архипчук О. А., Захарченко С. М.*, Високолінійні порозрядні АЦП з ваговою надлишковістю, побудовані на неточних елементах, для систем цифрової реєстрації і оброблення анало-

гових сигналів. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2005. – 125 с.

6. *Лужецький В. А.* Висконадійні математичні процесори Фібоначчі. – Вінниця, Універсум, 2000. – 248 с.

7. *Стахов А. П.* Коды золотой пропорции. – М.: Издательство «Радио и связь», 1984. – С. 152.

8. *Азаров О. Д., Кадук О. В.* Стратегії самокалібрування характеристики перетворення АЦП порозрядного кодування із ваговою надлишковістю // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 1. – С. 102-110.

9. Spartan-3E Field-Programmable Gate Arrays Family / Xilinx. Режим доступу: http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds312.pdf.

10. AD7641: 18-BIT, 2 MSPS SAR ADC / Analog Devices. Режим доступу: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7641.pdf.

Подано до редакції 23.03.2010