

УДК 681.3:621.375

Азаров О.Д., д.т.н.,
Дудник О.В.,
Кириленко Д.О.

МЕТОД ЛІНЕАРИЗАЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕТВОРЕННЯ АЦП СЛІДКУВАЛЬНОГО ТИПУ З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ

Вінницький національний технічний університет

Проаналізовано можливості лінеаризації стрибкоподібної характеристики перетворення АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, побудованого на неточних елементах. Показано, що багатозначність зображення чисел у системах числення з ваговою надлишковістю дозволяє уникати появи розривів на характеристиці перетворення ЦАП та виконувати лінеаризацію характеристики перетворення в АЦП, що містить такий ЦАП, за допомогою межових кодових комбінацій. Визначено критерій та оцінено ефективність запропонованого підходу.

Вступ

АЦП слідкувального типу відрізняються від інших типів АЦП відносно простою структурою та високим темпом видачі результатів, оскільки вихідний код доступний для зчитування на кожному такті перетворення [9, 14].

Водночас зараз виробництво і застосування багаторозрядних АЦП слідкувального типу значно скоротилось. Це пояснюється складністю лінеаризації стрибкоподібної характеристики перетворення (ХП) вказаного типу АЦП, побудованого на неточних елементах, із зростанням їх розрядності.

Актуальність

Традиційно в АЦП різноманітних типів, зокрема, порозрядного наближення, послідовно-паралельних АЦП, для підвищення точності, у тому числі лінійності ХП, використовують різноманітні методи калібрування та коригування [2, 5, 6]. Водночас перенесення вказаних підходів на АЦП слідкувального типу, побудованого на неточних елементах, зокрема, неточному ЦАП, є недоцільним. Це пояснюється тим, що в АЦП слідкувального типу на основі двійкової системи числення (СЧ) процедуру коригування похибок ХП необхідно проводити на кожному такті перетворення, а це значно знижує швидкість перетворення [10, 14].

Водночас варто відзначити, що всі багаторозрядні ЦАП без вживання спеціальних заходів, по суті, є неточними,

оскільки їхня кінцева похибка перетворення не відповідає заявленій роздільній здатності [3]. Це призвело до поступового витіснення двійкових АЦП слідкувального типу пристроями з кращими параметрами (АЦП послідовного наближення, сигма-дельта АЦП).

Разом із тим, якщо здійснювати побудову АЦП слідкувального типу з використанням ЦАП з ваговою надлишковістю (ВН), то стає можливим застосування принципово нового методу лінеаризації ХП шляхом «зшивання» стрибків аналогового компенсуючого сигналу по діапазону перетворення за допомогою межових кодових комбінацій (КК).

При цьому, слід відзначити, що у науково-технічній літературі методи лінеаризації стрибкоподібної ХП АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю практично не розглянуто. Тому тема статті, присвячена дослідженню запропонованого методу лінеаризації ХП АЦП слідкувального типу з ВН, побудованого на неточних елементах, є актуальною.

Мета

Метою досліджень є підвищення точності перетворення АЦП слідкувального типу, побудованого на неточних елементах, що досягається лінеаризацією стрибкоподібної ХП пристрою шляхом формування компенсуючої аналогової величини в діапазоні перетворення з використанням ЦАП, побудованого на основі систем числення з ваговою надлишковістю (СЧВН).

Постановка задач

1) проаналізувати запропонований метод лінеаризації стрибкоподібної ХП АЦП слідкувального типу з ВН, побудованого на низькоточних аналогових вузлах;

2) визначити критерій та оцінити ефективність запропонованого методу лінеаризації ХП АЦП слідкувального типу з ВН.

Розв'язання задач

Внаслідок змінення умов навколишнього середовища, наприклад, температури, вологості, тиску та інших чинників, а також у процесі старіння параметри і характеристики аналогових вузлів перетворювачів форми інформації (ПФІ) змінюються. Вказана особливість призводить до

відхилення ваг розрядів ЦАП від їх номінальних значень та, як наслідок, порушення лінійності ХП АЦП, що зокрема, проявляється у появі на ній стрибкоподібності, зокрема, немонотонності, а також зон пропуску кодів.

Так, наприклад, ХП 8-ми розрядного двійкового ЦАП, побудованого на неточних елементах, за умов відхилення від номінальних значень ваг трьох старших розрядів може мати такий вигляд (рис. 1). При цьому неточними елементами вважаються такі, в яких відхилення параметрів від їх номінальних значень перевищують кінцеву похибку перетворення. Тут $K_{ВХ}$ – цифровий еквівалент вхідного коду, $A_{ВИХ}$ – вихідний аналоговий сигнал.

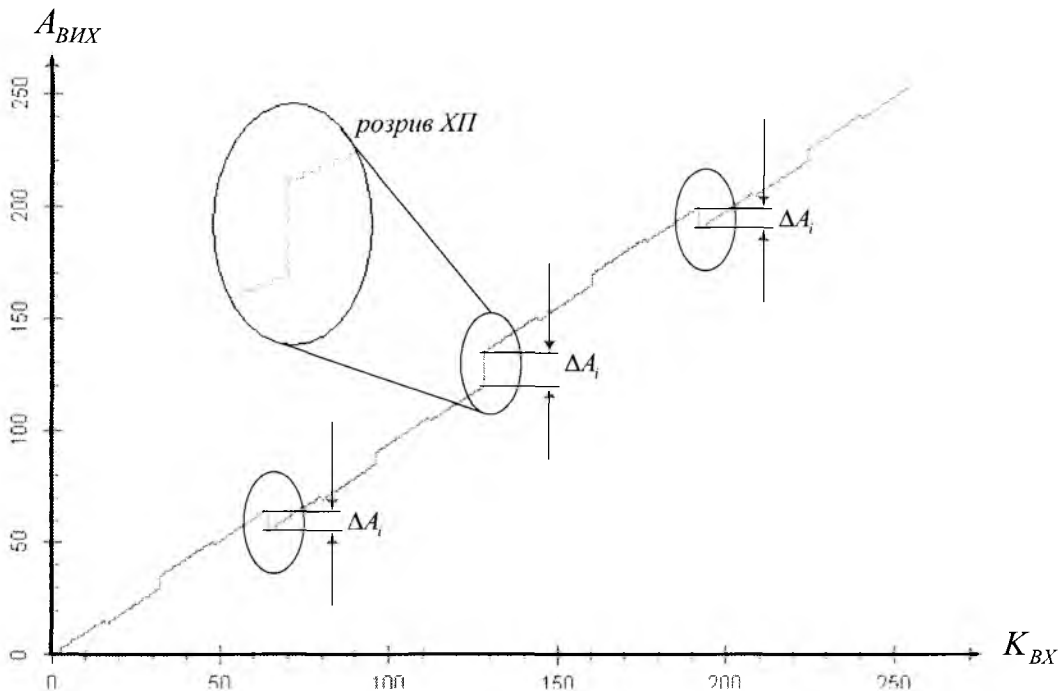


Рис.1. ХП неточного двійкового ЦАП

Немонотонність та розриви ХП неточного двійкового ЦАП відповідним чином впливають і на точність роботи АЦП, що містить вказаний ЦАП [1, 2, 7]. Так, наприклад, для 8-ми розрядного двійкового АЦП слідкувального типу з низькими вимогами на допуск елементної бази ($\delta Q = 15\%$) ХП може мати такий вигляд (рис. 2). При цьому, δQ – відносна похибка завдання ваги розряду, що описується таким виразом:

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

де ΔQ_i – відхилення реальної ваги i -го розряду від свого номінального значення; Q_i – значення аналогової величини (струму або напруги), що відображає реальну вагу i -го розряду пристрою. На рис.2 $K_{ВИХ}$ – цифровий еквівалент аналогового сигналу, $A_{ВХ}$ – вхідний аналоговий сигнал.

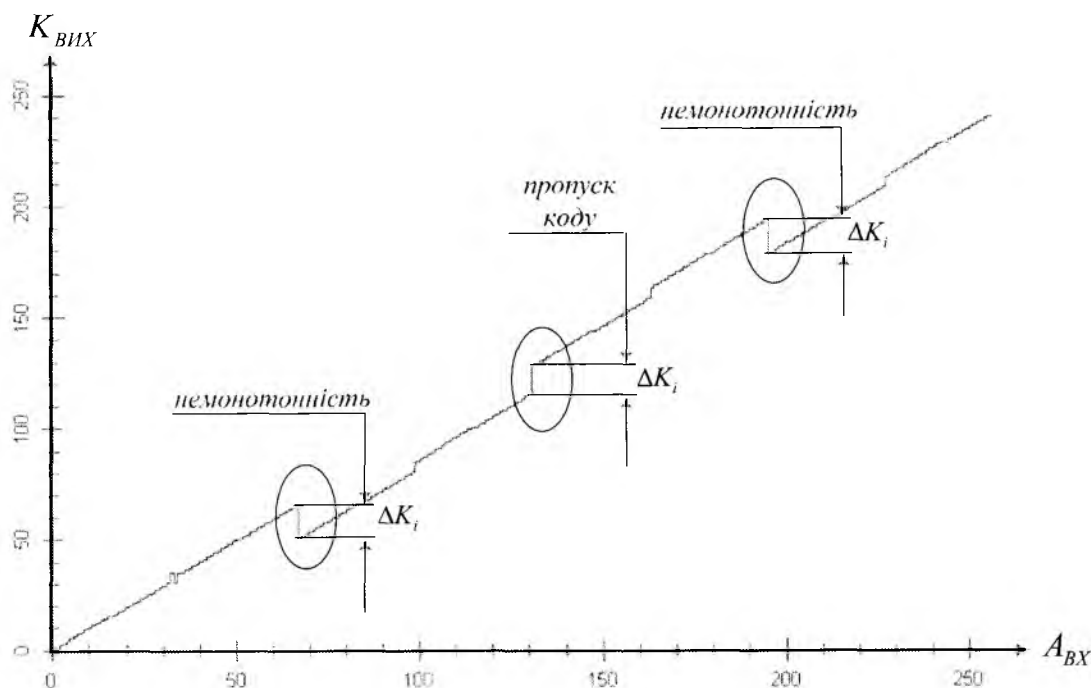


Рис.2. ХП двійкового АЦП слідкувального типу

Нестабільність та пропуски кодів ХП ПФІ спричинені невідповідністю ваг розрядів заданого базису СЧ вагам розрядів реалізованого або поточного базисів СЧ. Заданий базис – це такий, що являє собою набір номінальних ваг розрядів. Реалізований та поточний базиси – це такі, що являють собою набір реальних ваг розрядів, що фізично проявляються в реальних АЦП і ЦАП, побудованих на основі заданого базису СЧ, після їх виготовлення та в процесі експлуатації відповідно [6].

Вказані особливості призводять до зростання вище припустимої норми інтегральної та диференційної нелінійностей ХП ПФІ. При цьому інтегральна нелінійність (ІНЛ) – це максимальне відхилення реальної ХП від лінії, що з'єднує її початкову і кінцеву точки. Диференціальна нелінійність (ДНЛ) – це максимальне відхилення дійсних значень кроків квантування ХП від їх номінального значення.

Таким чином, виникає задача лінеаризації ХП вказаних ПФІ.

Разом із тим, слід відзначити, що ЦАП із ВН має нерозривну ХП, а це надає можливість використання нового методу

формування компенсуючої аналогової величини в АЦП слідкувального типу на основі СЧВН і як наслідок, отримання нерозривної лінійної ХП.

При цьому, наявність вагової надлишковості в рамках ПФІ істотно змінює характер перетворювальної шкали порівняно із двійковою СЧ. На рис. 3 наведено діаграми формування перетворювальних шкал для розрядних сіток ЦАП на основі двійкової СЧ і СЧ із базисом Фібоначчі ($p = 1$) [12]. Тут:

$$\Delta A_i = \sum_{j=0}^{i-1} Q_j - \text{діапазон перетворювальної}$$

шкали для i -го розряду;

$$\Delta A'_i = \sum_{j=0}^{i-1} Q_j - Q_i = \Delta \tilde{Q}_i - \text{ширина зони пе-}$$

рекриття або абсолютна вагова надлишковість для i -го розряду. Так, у випадку двійкової СЧ перекриття відсутні. Це виникає внаслідок її нулевої вагової надлишковості.

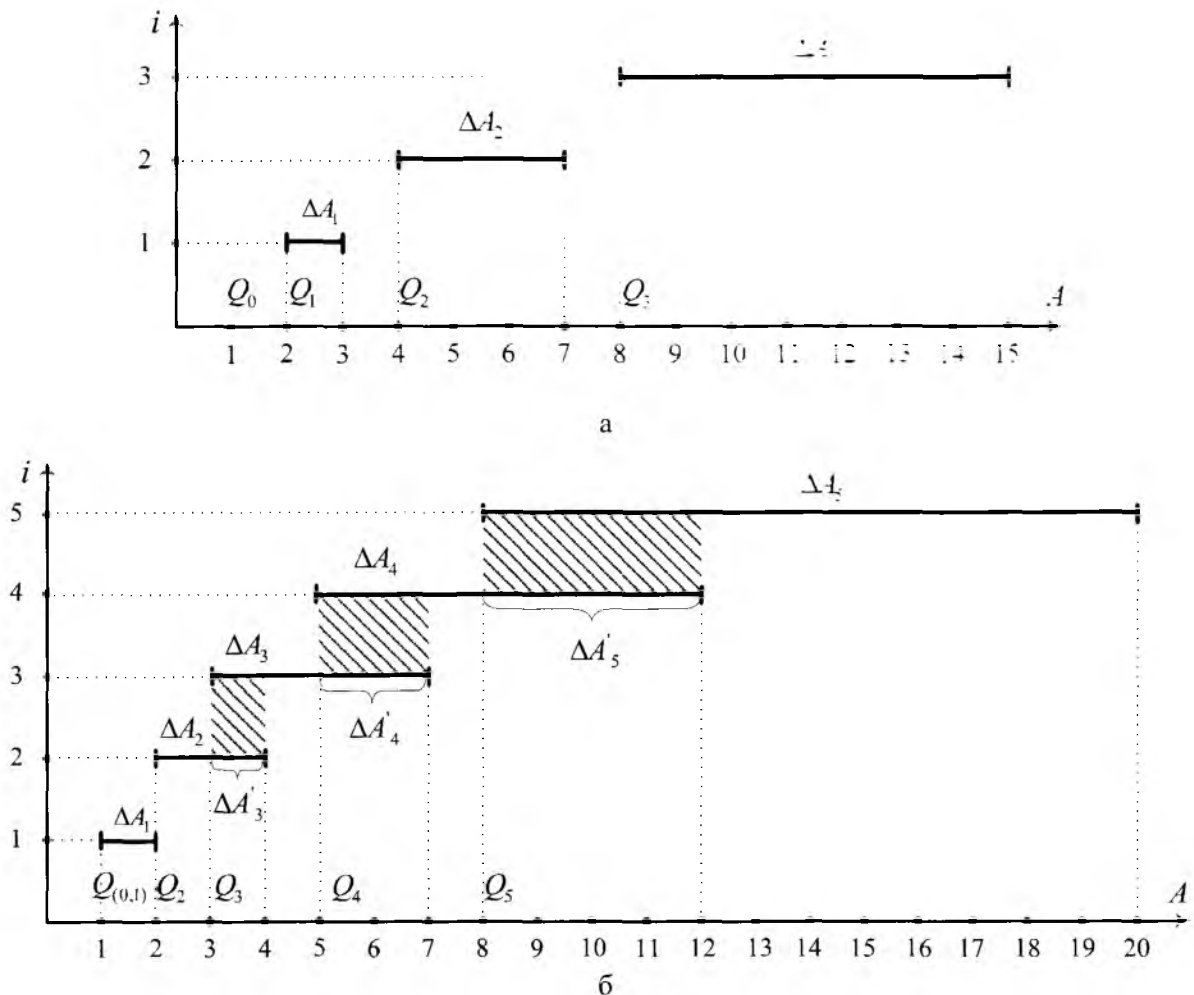


Рис. 3. Перетворювальні шкали: а) двійкової СЧ; б) СЧВН – Фібоначчі

При відхиленні ваг розрядів двійкового ЦАП можуть виникнути розриви ХП. У випадку СЧВН із базисом Фібоначчі ($p = 1$) для $i = 3, 4, 5$ відповідно має місце: $\Delta A'_3 = 1$; $\Delta A'_4 = 2$; $\Delta A'_5 = 4$.

Саме ця особливість є аргументом того, що у випадку побудови ЦАП на основі СЧВН є можливість використання принципово нової процедури генерування компенсуючого сигналу (A_K) в АЦП із застосуванням межових КК. Це дозволяє «зшивати» тобто зменшувати до мінімуму похибку квантування АЦП слідкувального типу, тобто різницю у значеннях аналогового сигналу, що відповідає сусіднім кодовим комбінаціям.

У цьому випадку процедура лінеаризації стрибкоподібної ХП АЦП слідкувального типу з ВН зводиться до пошуку

сусідніх або межових КК в ПФІ вказаного типу.

Межові КК – це такі коди (N'_i та N''_i), аналогові еквіваленти яких відрізняються не більше ніж на значення одного молодшого кванту ПФІ. Наявність вказаних КК пояснюється властивістю багатозначності зображення величин у СЧВН [2, 12].

Для межових КК виконується така рівність:

$$A_i'' = A_i',$$

де A_i'' – аналоговий еквівалент коду N''_i , причому $A_i'' = \sum a_i'' \cdot Q_i$, де a_i'' – розрядні коефіцієнти коду N''_i , Q_i – ваги розрядів ПФІ; A_i' – аналоговий еквівалент коду N'_i , причому

$$A_i' = \sum a_i' \cdot Q_i,$$

де a_i' – розрядні коефіцієнти коду N_i' .

В основу методу лінеаризації за допомогою межових КК покладено принцип умовного розбиття розрядної сітки перетворювача на групу «неточних» m старших розрядів і «точних» $n-m$ молодших (рис. 4) [2]. Належність до «точних» молодших розрядів вибирається з умови, що

їх абсолютні відхилення не перевищують половини молодшого значимого кванта:

$$\Delta Q_i \leq 0,5 \cdot Q_0,$$

де Q_0 – значення аналогової величини, що відображає вагу молодшого кванта ПФІ.

При цьому межові комбінації шукаються тільки для групи «неточних» розрядів.

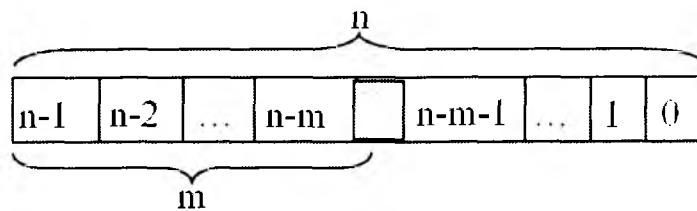


Рис. 4. Модель розрядної сітки АЦП у режимі самокалібрування

Пошук межових КК для кожного «неточного» i -го розряду здійснюється з використанням алгоритму порозрядного наближення [2]. При цьому виконується двократно врівноваження допоміжного сигналу $A_{калі}$ із вмиканням і без вмикання i -го розряду. Це є можливим завдяки наявності рекурентних співвідношень між вагами розрядів ($Q_i = Q_{i-1} + Q_{i-2} + \dots + Q_{i-p-1}$), а також операції згортання та розгортання коду [12].

полягає в заміні одиниці в i -му розряді і нулів у $(i-1)$ -му, $(i-2)$ -му, ..., $(i-p-1)$ -му розрядах їхніми інверсіями [2]. Так, для золоті пропорції ($\alpha=1,618$) і кодів Фібоначчі операція згортки полягає в заміні одиниць в $(i-1)$ -му і $(i-2)$ -му розрядах одиницею в i -му розряді.

При цьому операція згортання полягає в заміні нуля в i -му і одиниць у $(i-1)$ -му, $(i-2)$ -му, ..., $(i-p-1)$ -му розрядах їхніми проінвертованими значеннями. Розгортання – операція, зворотна згортанням і

Для позначення згортання використовується символ $\uparrow \downarrow$. Розгортання позначається як $\downarrow \uparrow$. У результаті проведення всіх можливих розгортань отримується повністю розгорнута форма коду. Приклад виконання операцій згортки-розгортки наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Виконання операцій згортання-розгортання в кодах Фібоначчі

А _{ВХ}	Ваги розрядів								
	55	34	21	13	8	5	3	2	1
55	0	1	1	0	0	0	0	0	
55	1	0	0	0	0	0	0	0	
55	0	1	1	0	0	0	0	0	

Результатом подвійного врівноваження кожного «неточного» i -го розряду є межові комбінації вигляду, наведеного в табл. 2. Тут, N_i' та N_i'' коди, що мають

однакові аналогові еквіваленти A_i'' та A_i' і є зображенням i -ої межової комбінації.

Алгоритм пошуку межових КК зображено на рис. 5. Варто відзначити, що результати пошуку межових КК можуть

багатократно використовуватися у процесі основного перетворення, аж поки не виникне потреба здійснювати повторну процедуру лінеаризації.

Причому критерієм для проведення чергової процедури пошуку межових КК

слугує рівень зміни ваг розрядів ПФІ, які в свою чергу залежать від змінення параметрів навколишнього середовища або часу старіння.

Таблиця 2. Межові кодові комбінації

Q_i	128,86	75,00	46,78	29,60	17,50	10,50	6,98	4,00	2,71	1,64	1,00	A_i
N_i'	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	29,60
N_i''	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	29,00

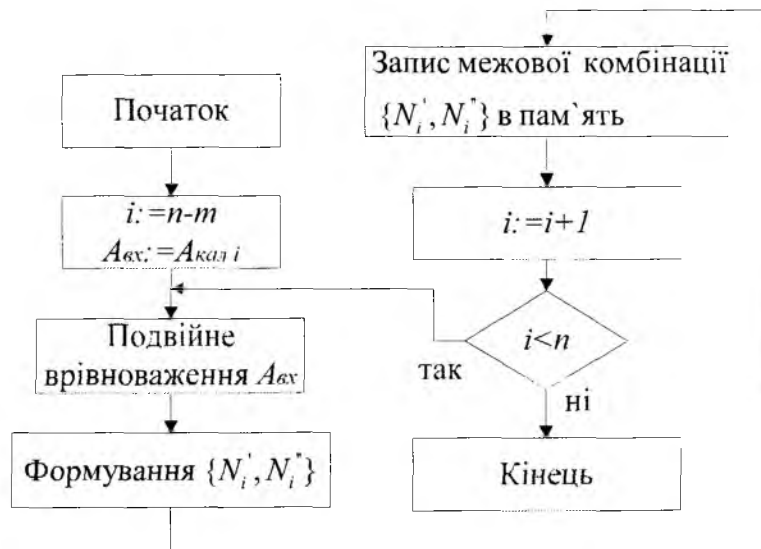


Рис.5. Алгоритм пошуку межових КК

У процесі формування A_K в АЦП слідкувального типу кодові комбінації в лічильному пристрої постійно змінюються.

При цьому, згідно запропонованого методу лінеаризації за допомогою межових КК правило лічби (зміни КК у регістрі Rg лічильного пристрою) у ПФІ задається таким виразом:

$$Rg.N = \begin{cases} N_i', & \text{якщо } Rg.N := N_i''; \\ N_i'', & \text{якщо } Rg.N := N_i'. \end{cases}$$

де $Rg.N$ – код в регістрі лічильного пристрою АЦП слідкувального типу.

На рис. 6 наведено графічне зображення процедури лінеаризації стрибкоподібної ХП 11-ти розрядного ЦАП із ВН на основі СЧВН із $\alpha = 1,618$ зі значними відхиленнями ваг розрядів від їх номінальних значень.

Варто вказати, що, при цьому, графік ХП ЦАП із ВН будується шляхом послідовного перебору всіх можливих КК таким чином, як це зображено в табл. 3, а ваги розрядів ЦАП мають значення, наведені в табл. 4.

На рис. 7 зображено ХП 11-ти розрядного АЦП слідкувального типу на основі СЧВН із $\alpha = 1,618$ та $\delta Q = 15\%$, що використовує запропонований метод лінеаризації ХП. При цьому, слід відзначити, що до проведення лінеаризації на графіку ХП присутні немонотонність та зони пропуску кодів. Після ж проведення лінеаризації вказані спотворення на графіку ХП відсутні.

Проаналізуємо можливості структурно-функціональної реалізації АЦП із ВН, в якому використовується запропонований метод лінеаризації стрибкоподібної ХП. Визначимо набір вузлів, що їх пови-

нна містити структурна схема АЦП слідкувального типу із ВН, що використовує запропонований метод лінеаризації [8, 11, 13]:

- для перемикання виходів генераторів аналогових сигналів – аналоговий комутатор (АК);
- для реалізації процедури самокалібрування – генератор калібрувального (Акал) сигналу (ГКС);
- для генерування Ак – лічильний пристрій (ЛЧ) та цифроаналоговий пере-

творювач із ВН (α -ЦАП);

- для реалізації процедури порівняння вхідного аналогового сигналу ($A_{вх}$) і Ак використовується схема порівняння (СП);

- для виконання обчислень при пошуку межових КК та розрахунку вихідного двійкового коду ($K_{вх}$) – цифровий обчислювальний пристрій (ЦОП);

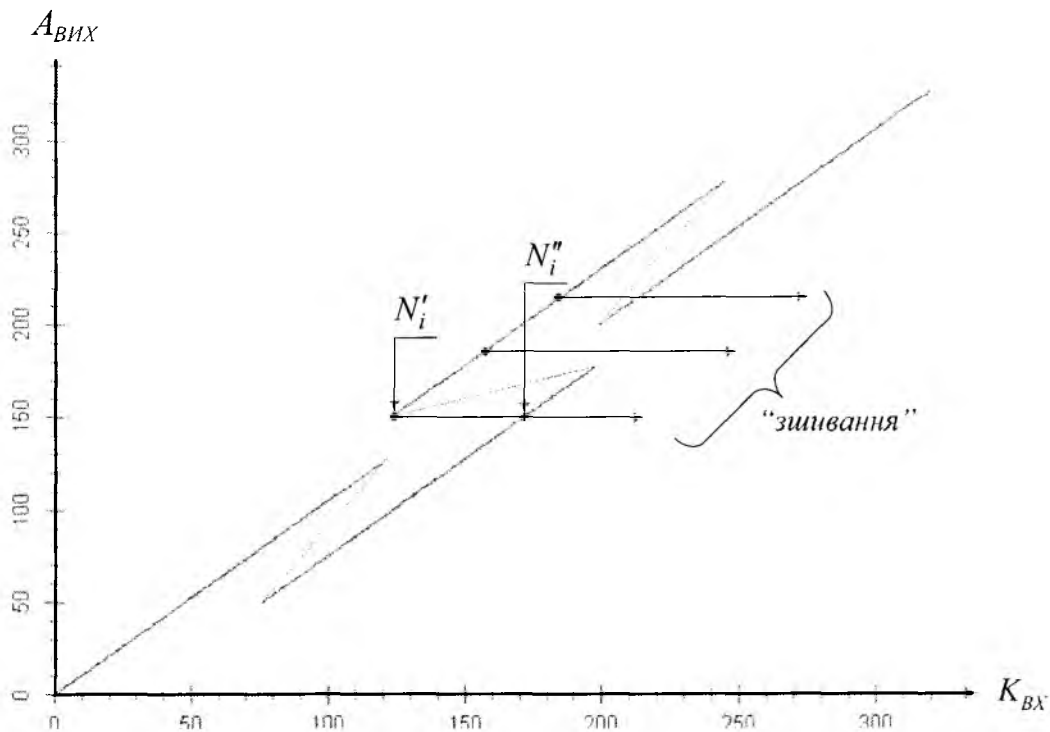


Рис. 6. Графічне зображення лінеаризації стрибкоподібної ХП неточного ЦАП із ВН

Таблиця 3. Кодові комбінації ХП ЦАП із ВН

№ КК	a_{10}	a_9	a_8	a_7	a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0	$K_{вх}$	$A_{вх}$
0.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,99
...
1023.	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	197,35	195,66
1024.	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	122,96	128,86
...
2046.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	319,32	323,53
2047.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	320,32	324,52

Таблиця 4. Цифрові еквіваленти реальних ваг розрядів ЦАП із ВН

№ розряду	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
$K(Q_i)$	128,86	75,00	46,78	28,94	17,50	11,00	6,98	4,00	2,71	1,64	1,00

– для збереження цифрових еквівалентів ідеальних ваг розрядів α -ЦАП та межових КК – блок постійної (БПП) та оперативної пам'яті (БОП) відповідно;

– для координації роботи вищезгаданих блоків згідно режиму роботи АЦП – блок керування (БК).

Структурна схема АЦП слідкувального типу з ВН, що реалізує вищеописаний метод лінеаризації, наведена на рис. 8.

Вказаний ПФІ працює у двох режимах: в режимі основного перетворення і самокалібрування. При цьому режим функціонування задається БК. Визначення межових комбінацій відбувається по команді БК за допомогою ЦОП та ГКС. Визначені межові комбінації зберігаються в БОП та використовуються під час роботи ПФІ.

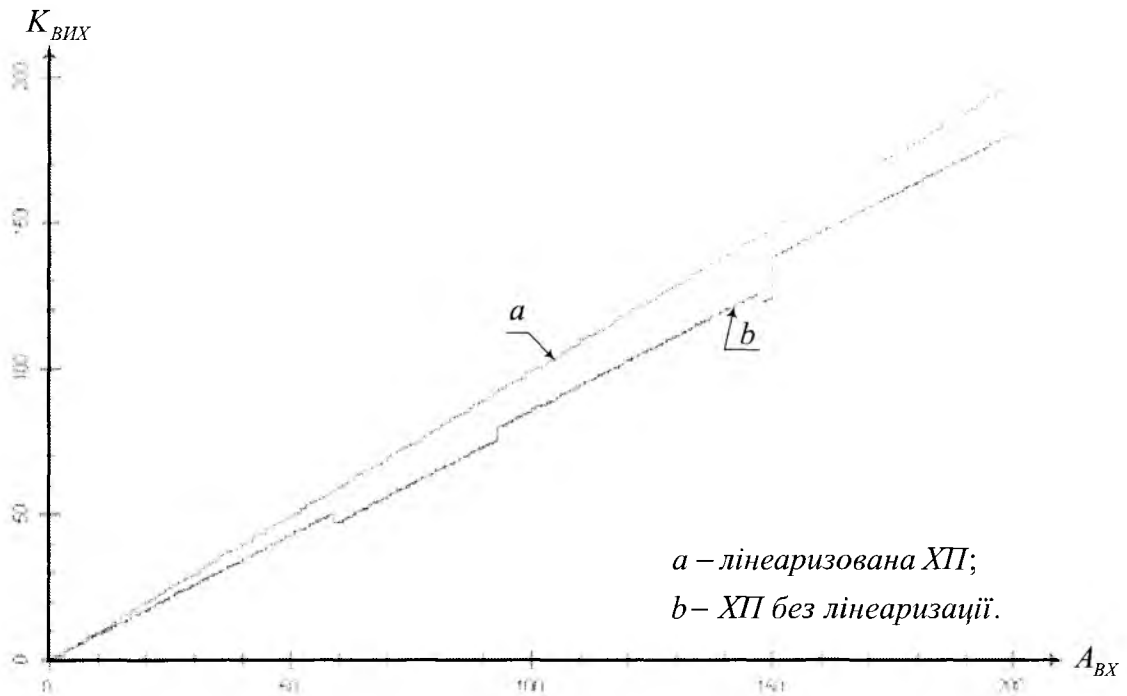


Рис. 7. ХП АЦП слідкувального типу, що самокалібрується, з ВН

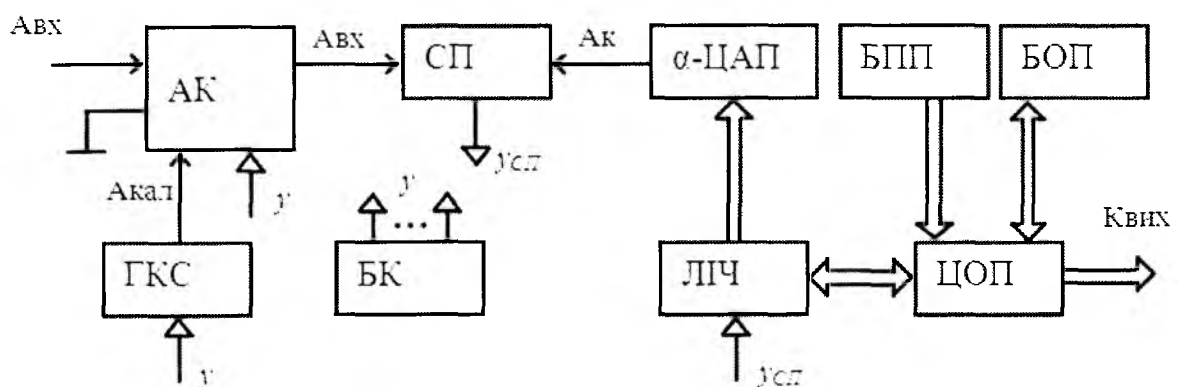


Рис. 8. АЦП слідкувального типу, що самокалібрується, з ВН

Критерієм ефективності запропонованого методу лінеаризації стрибкоподібної ХП є зменшення похибки перетворення АЦП слідкувального типу з ВН.

При цьому, ефективність запропонованого методу лінеаризації ХП АЦП слідкувального типу з ВН пропонується визначати у вигляді [4]:

$$E = \frac{\Delta K}{\Delta K_{CK}}$$

де ΔK та ΔK_{CK} – абсолютне значення похибки (ІНЛ або ДНЛ) ХП АЦП слідкувального типу без та з використанням запропонованого методу лінеаризації відповідно, причому:

$$\Delta K_{CK} = \frac{A_{BX} + \Delta_{\Sigma ЛН}}{1 + \Delta_{\Sigma СК}} - A_{BX} = A_{BX} \left(\frac{1}{1 + \Delta_{\Sigma СК}} - 1 \right) + \frac{\Delta_{\Sigma ЛН}}{1 + \Delta_{\Sigma СК}}, \text{ а}$$

$$\Delta K = \frac{A_{BX} + \Delta_{\Sigma КАН}}{1 + \Delta_{\Sigma КОМ}} + \Delta_{0СП} - A_{BX} = A_{BX} \left(\frac{1}{1 + \Delta_{\Sigma КОМ}} - 1 \right) + \left(\frac{\Delta_{\Sigma КАН}}{1 + \Delta_{\Sigma КОМ}} \right) + \Delta_{0СП}.$$

У табл. 5 наведено оцінки ефективності запропонованого методу лінеаризації

Таблиця 5. Ефективність методу лінеаризації ХП АЦП слідкувального типу з ВН

Кількість розрядів $n_2(n_\alpha)$	Параметри	Значення параметру (МЗР)		Ефективність (Е)
		Без лінеаризації	З лінеаризацією	
10 (14)	М(ІНЛ)	10,77	2,37	4,54
	М(ДНЛ)	14,82	2,41	6,14
13 (19)	М(ІНЛ)	123,7	2,60	47,57
	М(ДНЛ)	178,6	2,61	68,42
16 (23)	М(ІНЛ)	953,41	2,95	323,18
	М(ДНЛ)	1341,32	2,97	451,62

Аналіз наведених даних показує, що ефективність запропонованого підходу зростає в міру зростання кількості розрядів АЦП.

Висновки

Проаналізовано запропонований метод лінеаризації стрибкоподібної ХП АЦП слідкувального типу з ВН. Показано, що застосування запропонованого підходу дозволяє отримати лінійну ХП АЦП побудованого на неточних елементах без визначення коригувальних поправок та відповідно без втрати швидкодії.

ції стрибкоподібної ХП, розраховані на основі значень ІНЛ та ДНЛ для АЦП слідкувального типу різної розрядності на основі СЧВН із $\alpha=1,618$ з допуском на елементну базу $\delta Q=15\%$.

Значення ІНЛ та ДНЛ були отримані для 100 різних базисів ваг розрядів АЦП слідкувального типу із ВН. Після того було обраховано математичне сподівання вибірки за такою формулою:

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

де n – обсяг вибірки, $\Delta \bar{Q}_i$ – i -те значення похибки що оцінюється.

Варто відзначити, що за умов вказаного допуску відхилення ваг старших розрядів від номінальних значень для 14÷23 розрядних АЦП із ВН можуть становити 78,15÷5940,45 одиниць молодшого розряду, залежно від розрядності.

Визначено критерій ефективності та оцінено ефективність запропонованого методу лінеаризації стрибкоподібної ХП АЦП слідкувального типу з ВН, що базується на використанні межових КК. Показано, що ефективність вказаного підходу зростає в міру зростання розрядності, а також при зниженні вимог на розкид параметрів елементної бази.

Література

1. Kurosawa N. Explicit analysis of channel mismatch effects in time-interleaved ADC systems / Kurosawa N., Kobayashi H.,

Maruyama K., Sugawara H., Kobayashi K. // IEEE Trans. Circuit Syst. I. – March 2001. – Vol. CAS. – 48. – P.261 – 271.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Азаров О.Д. Оцінювання міжкалібрувального інтервалу для багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного перетворення з ваговою надлишковістю / О.Д. Азаров, О.В. Кадук // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: Міжнародний науково-технічний журнал. – Вінниця, 2009. - №1. (14). – С. 5 – 12.

6. Азаров О.Д. Пряме та зворотне перетворення «робочий код – цифровий еквівалент» в АЦП і ЦАП, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю / О.Д. Азаров, О.В. Кадук, О.В. Дудник, О.Г. Муращенко // Проблеми інформатизації та управління. – 2010. - №2. – С. 6 – 13.

7. Азаров О.Д. Характеристика перетворення порозрядного АЦП, що самокалібрується, побудованого на неточному ЦАП із ваговою надлишковістю / Азаров О. Д., Кадук О. В. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2007. - № 3 (10). – С. 8 – 18.

8. Багацкий В. А. Теория построения, проектирования и практическая реализация аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей общего применения : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.13.08 / В. А. Багацкий. – К. – 1994. – 35 с.

9. Гитис Э. И. Аналого-цифровые преобразователи / Э. Гитис, Е. Пискулов. – М. : Энергоиздат. 1981. – 360 с.

10. Грушвицкий Р.И. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем / Грушвицкий Р.И. Мурсаев А.Х., Смоллов В.Б.: - Л.: Энергоатомиздат. – 1989. – 160 с.

11. Потемкин И.С. Функциональные узлы цифровой автоматики / Потемкин И.С. – М. – Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.

12. Стахов А. П. Коды золотой пропорции / А. П. Стахов. – М.: – Радио и связь, 1984. – 152 с.

13. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника / Угрюмов Е.П. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 528 с.

14. Уолт Кестер. Аналого-цифровое преобразование / пер. с англ. Володина Е.Б. – М. – Техносфера, 2007. – 1019 с.