

КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА КОМПОНЕНТИ ТЕХНІКИ

УДК 681.3:621.375

ОЦІНЮВАННЯ МІЖКАЛІБРУВАЛЬНОГО ІНТЕРВАЛУ ДЛЯ БАГАТОРОЗРЯДНИХ ЦАП І АЦП ПОРОЗРЯДНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ

О.Д. Азаров, О.В. Кадук

Вступ

Застосування багаторозрядних ЦАП і АЦП послідовного наближення в інформаційно-вимірвальних системах, багатоканальних системах збору даних, системах управління та інше вимагає дотримання їх метрологічних характеристик протягом всього циклу експлуатації, а також при роботі у складних умовах. Слід відзначити, що за таких вимог у вказаних пристроях виникають параметричні відмови. Вони проявляються у зміні параметрів аналогових вузлів ЦАП та АЦП і призводять до виходу похибки перетворення за межі допуску. Це асоціюється з відмовою пристрою в цілому. Вказана проблема вирішується як шляхом удосконалення елементної бази, так і використанням різного роду коригувань і калібрувань [1 – 4]. Водночас слід зазначити, що можливості удосконалення елементної бази, як правило, є обмеженими. Так аналіз моделей багаторозрядних ЦАП і АЦП, що випускаються серійно провідними фірмами світу, зокрема, Analog Devices, Intersil, Maxim Integrated Products, Burr Brown, Texas Instruments показує, що під час змінення умов навколишнього середовища похибки перетворення можуть значно (у декілька разів) перевищувати роздільну здатність. Другий шлях вирішення вказаної проблеми шляхом періодичного застосування процедур коригування і самокалібрування дозволяє запобігати виходу похибки перетворення за зону допуску.

Актуальність

Існуючі підходи відновлення параметрів відмов описані в роботах [1 – 3]. Водночас питання відновлення параметричних відмов багаторозрядних ЦАП і АЦП розглянуто недостатньо. Причинами появи таких відмов є вихід за зону допуску параметрів аналогових вузлів ЦАП, зокрема, дрейфу порогу спрацювання схеми порівняння, зміна значень розрядних струмів перетворювача код-струм та інше. Для зменшення похибки перетворення перспективним є використання процедур самокоригування і самокалібрування в багаторозрядних ЦАП і АЦП із ваговою надлишковістю [4 – 6]. Використання ваговою надлишковістю дозволяє в комплексі вирішувати проблеми підвищення швидкодії вказаних пристроїв і також гарантувати знаходження похибки перетворення в межах допуску. Проте вказаних підхід щодо підвищення відмовостійкості такого класу пристроїв практично не описано в науково-технічній літературі. Відповідно відсутні оцінки міжкалібрувального інтервалу для ЦАП і АЦП. Тому тема статті, що присвячена вирішенню цього питання, є актуальною.

Мета досліджень

Метою статті є визначення й оцінювання міжкалібрувального інтервалу для багаторозрядних ЦАП і АЦП із ваговою надлишковістю, що дозволить підвищити параметричну відмовостійкість вказаних пристроїв під час змінення умов навколишнього середовища і в процесі старіння.

Постановка задач

1. Визначити вплив параметричних відмов на похибки перетворення багаторозрядних ПФІ із ваговою надлишковістю.
2. Вибрати і проаналізувати модель параметричної надійності ЦАП і АЦП порозрядного перетворення із ваговою надлишковістю, що самокалібруються.
3. Визначити міжкалібрувальний інтервал для вказаних пристроїв, в межах якого параметричні відмови, що з'являються в процесі експлуатації, не призведуть до виходу похибки перетворення за межі встановленого допуску.

Розв'язання задач

Під впливом різноманітних чинників навколишнього середовища, таких як: температура, радіація, вологість та інші і в процесі старіння параметри перетворювачів інформації змінюються [7 – 9]. Тому єдиним шляхом підтримання характеристик ПФІ є виконання періодичного калібрування характеристики перетворення. Автори пропонують вказану процедуру здійснювати шляхом самокалібрування ваг розрядів у так званих ЦАП і АЦП із ваговою надлишковістю. Вагова надлишковість полягає у перевищенні суми ваг молодших розрядів над старшими:

$$Q_i < \sum_{j=0}^{i-1} Q_j,$$

де Q_i - вага i -го розряду ЦАП.

Це має місце в позиційних системах числення із ваговою надлишковістю. Залежно від закону завдання значення ваги кожного i -го розряду по відношенню до молодших $Q_i = f(Q_{i-1}, Q_{i-2}, \dots, Q_{i-k})$ ці системи можна поділити на системи з природним і штучним набором ваг розрядів. Природний набір – це такий, в якому відношення між вагами сусідніх розрядів має певне постійне значення, що називається основою системи числення $\alpha = \frac{Q_i}{Q_{i-1}}$. При цьому ваги розрядів мають такі значення:

$$Q_0 = \alpha^0 \cdot Q_0; \quad Q_1 = \alpha^1 \cdot Q_0; \quad Q_2 = \alpha^2 \cdot Q_0; \quad \dots; \quad Q_{n-1} = \alpha^{n-1} \cdot Q_0,$$

де Q_0 – вага молодшого розряду. Прикладом надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ) із природним набором ваг розрядів є системи числення з основою $\alpha = \sqrt{2}$, $\alpha \approx 1,618$, $\alpha \approx 1,84$. Для НПСЧ зі штучним набором вага кожного розряду формується у рамках базису $Q_0, Q_1, Q_2, \dots, Q_{n-1}$, де вага кожного i -го розряду у загальному випадку дорівнює сумі певної кількості молодших розрядів

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{i-2} + \dots + Q_{i-k},$$

де k – деяке ціле число [4]. Можна вважати, що у цьому випадку набір ваг розрядів – це базис. Прикладом такого базису може бути набір ваг розрядів, пропорційних p -числам Фібоначчі [10].

ЦАП і АЦП, що побудовані на основі позиційних систем числення із ваговою надлишковістю, мають нерозривну характеристику перетворення, незважаючи на значне відхилення ваг розрядів від ідеальних значень [11]. Також для них можливим є виконання процедури самокалібрування. Процедура самокалібрування повинна передувати процесу перетворення і закінчуватися формуванням кодів реальних значень ваг розрядів. При цьому використовується модель розрядної сітки, що наведена на рис. 1. Вказана модель передбачає припасування значень ваг розрядів із заданим технологічним допуском δQ , причому досить значним – $1 \div 10\%$, що значно спрощує технологію виготовлення аналогових вузлів.

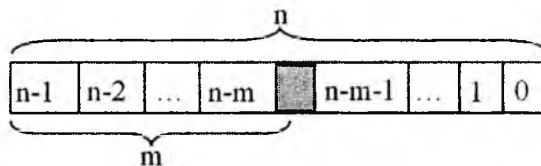


Рисунок 1 – Модель розрядної сітки α -ЦАП у режимі самокалібрування

Абсолютні відхилення ваг старших розрядів будуть значними і перевищувати вагу молодшого розряду. Тому розрядна сітка умовно розбивається на дві частини – точні молодші та неточні старші. Калібрування виконується для старших розрядів. Абсолютне відхилення молодших розрядів менше половини молодшого кванту:

$$\Delta Q_{i \max} \leq 0,5 \cdot Q_0,$$

де Q_0 – вага молодшого розряду, $\Delta Q_{i \max}$ – максимальне значення абсолютної похибки i -го розряду, що залежить від технологічного допуску δQ на відхилення від ідеального значення $Q_{i \text{ ід}}$ ваги розряду:

$$\Delta Q_{i \max} = \delta Q \cdot Q_{i \text{ ід}}. \tag{1}$$

Самокалібрування полягає у визначенні абсолютних відхилень ваг розрядів ЦАП (АЦП) від номінальних (дійсних) значень і визначення коригувальних поправок до характеристики вхід-вихід з перериванням процесу основного перетворення. При цьому визначаються відхилення ваг старших розрядів шляхом послідовного порівняння ваги поточного розряду із сумою певної групи сусідніх молодших розрядів. Це порівняння базується на основі існуючих між ними математичних співвідношень. Результати самокалібрування можуть багатократно використовуватися у процесі основного перетворення або вимірювання аж доти, поки внаслідок змінення параметрів аналогових вузлів ЦАП (АЦП) або вимірювального каналу не виникне потреба здійснювати повторне самокалібрування.

Структурні схеми надлишкового ЦАП, що самокалібрується, показана на рис. 2. Тут α -ЦАП – цифроаналоговий перетворювач, побудований на основі позиційних систем числення із ваговою надлишковістю, СхСк – схема самокалібрування, К – комутатор, Кл – аналоговий ключ.

Водночас слід зазначити, що оскільки ЦАП є частиною АЦП і процедури самокалібрування для них є подібною, то доцільно проводити аналіз на прикладі АЦП, структурна схема якого представлена на рис. 3. Тут ЦК – цифровий комутатор, α -ЦАП_{ос} і α -ЦАП_{дод} – основний і додатковий цифроаналогові перетворювачі, АК – аналоговий комутатор, що здійснює перемикання станів роботи схеми – режиму безпосереднього перетворення і самокалібрування, СП – схема порівняння, ЦОП – цифровий

обчислювальний пристрій, РПН1 і РПН2 – перший і другий регістри послідовного наближення, БК – блок керування, БРК – блок керованої розгортки коду, РГ – регістр, БКПНС – блок контролю параметрів навколишнього середовища.

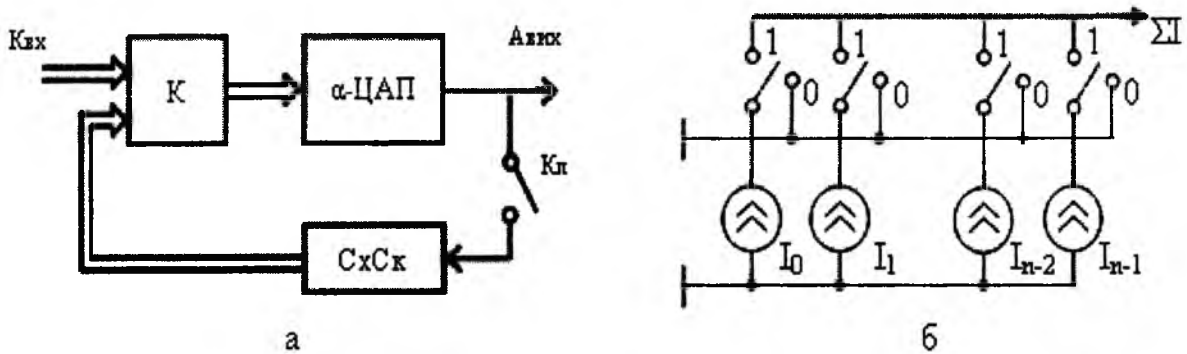


Рисунок 2 – Структурна схема ЦАП із ваговою надлишковістю, що самокалібрується (а), структурна схема струмового ЦАП (б)

Вказаних пристрій працює у двох режимах – безпосереднього перетворення і самокалібрування. Найефективнішою є стратегія самокалібрування з осередненням на розгортках [12]. Дана стратегія базується на можливості у позиційних системах числення із ваговою надлишковістю зображувати те саме число багатьма кодовими комбінаціями. Для цього, зокрема, використовуються операції згортки і розгортки [10].

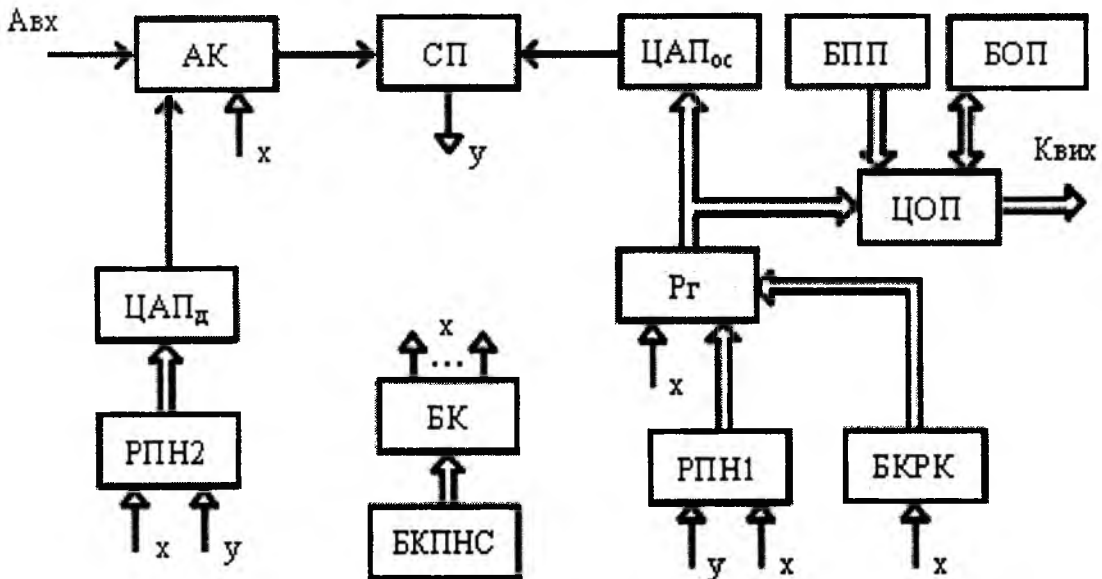


Рисунок 3 – Структурна схема АЦП із ваговою надлишковістю, що самокалібрується

Так, для золотої 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. Для позначення згортки використовується символ $\uparrow \downarrow$. Мікрооперація розгортки полягає в заміні одиниці i -го розряду одиницями в $(i-1)$ -му і $(i-2)$ -му розрядах, якщо в них знаходяться нулі. Розгортка позначається значком $\downarrow \uparrow$. Приклад виконання операцій згортки-розгортки наведено у табл. 1.

У вказаному пристрої реалізована саме процедура самокалібрування з осередненням на розгортках, граф-схему алгоритму якої показано на рис. 4.

Слід відзначити, що відхилення кожного «неточного» i -го розряду ΔQ_i буде складатися з виробничого допуску $\Delta Q'_i$ і експлуатаційного допуску $\Delta Q''_i$ [7].

$$\Delta Q_i = \Delta Q'_i + \Delta Q''_i.$$

Таблиця 1 – Виконання операцій згортки-розгортки в кодах Фібоначчі

A _{ВХ}	Ваги розрядів								Код
	34	21	13	8	5	3	2	1	
35	0	1	1	0	0	0	0	1	N'
35	1	0	0	0	0	0	0	1	N''
35	0	1	1	0	0	0	0	1	N'''
35	0	1	0	1	1	0	0	1	N ^{IV}
35	0	1	0	1	0	1	1	1	N ^V

Виробничий допуск – це припустимі відхилення параметрів вузлів та елементів, що визначаються можливостями технології виготовлення. Це так звані первинні похибки виготовлення [13]. Вони є усталеними і не змінюються. Коригування даних похибок здійснюється кожного разу перед експлуатацією після вмикання пристрою. Експлуатаційний допуск – це можливі вторинні похибки, що з'являються в процесі експлуатації під впливом різних чинників і через старіння. Вторинні похибки змінюються під час експлуатації пристрою.

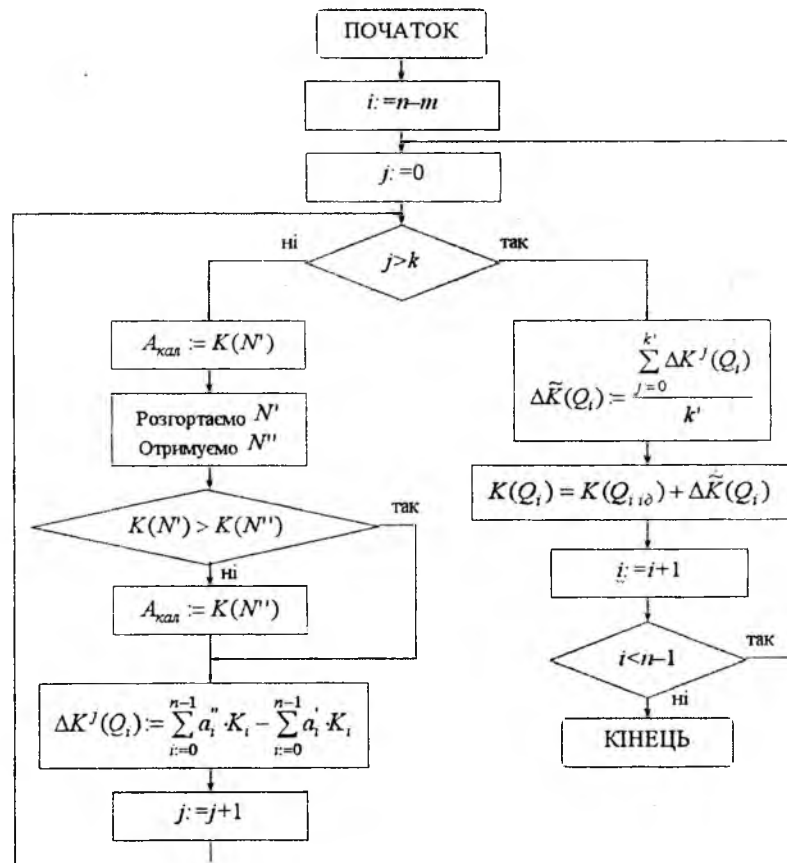


Рисунок 4 – Граф-схема алгоритму самокалібрування з осередненням на розгортках

Поява похибок у вагах розрядів має наслідком появу похибок інтегральної і диференційної нелінійності на характеристиці перетворення, що показано на рис. 5.

Ймовірність того, що дійсне значення ваги розряду Q_i буде знаходитися у межах технологічного допуску δQ , маючи нормальний закон розподілу значень ваг розрядів, можна визначити як [14]

$$p = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{Q_i - \Delta Q_i}^{Q_i + \Delta Q_i} e^{-\frac{(Q_i - \bar{Q}_i)^2}{2\sigma^2}} dQ,$$

де \bar{Q}_i – середнє значення ваги розряду, σ - середньоквадратичне відхилення.

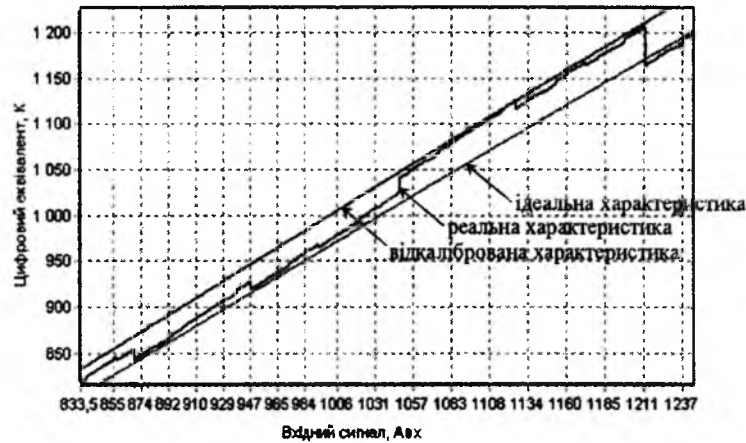


Рисунок 5 – Характеристики перетворення АЦП із ваговою надлишковістю ідеальна, реальні і після самокалібрування

При цьому ймовірність p є надійністю роботи схеми АЦП відповідно припустимим відхиленнями ваг розрядів, що задаються із точністю ΔQ . Як вже відмічалось, внаслідок зміння чинників навколишнього середовища (в основному температури) і старіння, Q_i буде змінюватися.

Якщо ввести позначення $u = \frac{Q_i - \bar{Q}_i}{\sigma}$, то ймовірність p можна представити в такому вигляді:

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\bar{u}_1} e^{-\frac{u^2}{2}} du - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\bar{u}_2} e^{-\frac{u^2}{2}} du = \Phi(u_1) - \Phi(u_2) = 2\Phi\left(\frac{\Delta Q}{\sigma}\right),$$

де $\Phi(u_1), \Phi(u_2)$ - нормована функція Лапласа. Під впливом зміни температури ΔT відбувається зміння \bar{Q}_i на рівень $\Delta \bar{Q}_i$, яку можна представити як

$$\Delta \bar{Q}_{iT} = \frac{\partial \bar{Q}}{\partial T} \Delta T.$$

Знаючи значення $\frac{\partial \bar{Q}}{\partial T}$ і зміну температури $\Delta T = T_i - T_{i-1}$ можна знайти значення $\Delta \bar{Q}_{iT}$.

Зміння ваги розряду в часі можна представити за допомогою такого співвідношення:

$$\Delta \bar{Q}_{it} = \frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} t$$

де t – час роботи АЦП. Загальні зміни

$$\Delta \bar{Q}_i = \Delta \bar{Q}_{iT} + \Delta \bar{Q}_{it}.$$

Параметрична надійність

$$p' = \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} \int_{\bar{Q}_i - \Delta Q_i}^{\bar{Q}_i + \Delta Q_i} e^{-\frac{[Q_i - (\bar{Q}_i + \Delta \bar{Q}_i)]^2}{2\sigma'^2}} dQ = \Phi(u_1') + \Phi(u_2'),$$

де $u_1' = \frac{\Delta Q_i - \Delta \bar{Q}_i}{\sigma'}$ і $u_2' = \frac{\Delta Q_i + \Delta \bar{Q}_i}{\sigma'}$.

Під впливом змін зовнішніх впливів (температури ΔT та ін.) і змін в часі відбувається зміна середньоквадратичного відхилення, в даному випадку

$$\sigma' = \left[\sigma^2 + \left(\frac{\partial \bar{Q}}{\partial T} \right)^2 (\Delta T)^2 + \left(\frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} \right)^2 t^2 \right].$$

Параметричну надійність можна розглядати як ймовірність збереження ваги розряду АЦП в заданих межах $Q < Q_{\max}$ або $Q > Q_{\max}$, де Q_{\max} - максимальне відхилення ваги розряду, що викликає відмову в роботі АЦП. У цьому випадку при $Q < Q_{\max}$

$$p = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Q_{\max}} e^{-\frac{(Q-\bar{Q})^2}{2\sigma^2}} dQ = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{(Q-\bar{Q})^2}{2\sigma^2}} dQ -$$

$$-\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{Q_{\max}} e^{-\frac{(Q-\bar{Q})^2}{2\sigma^2}} dQ = [0,5 + \Phi(u)]$$

де $u = \frac{Q_{\max} - \bar{Q}}{\sigma}$. При $Q > Q_{\max}$

$$p = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Q_{\max}} e^{-\frac{(Q-\bar{Q})^2}{2\sigma^2}} dQ = [0,5 - \Phi(u)].$$

Відхилення ваг розрядів від номінальних значень підлягають нормальному закону [8, 14]. Придатними вважаються ваги розрядів, для яких коефіцієнт мінливості χ_M дорівнює $\chi_M = 0,08 \div 0,15$, що відповідає відхиленню в межах ΔQ_i при середньоквадратичному відхиленні на рівні 3σ .

Вказані вторинні параметричні відмови доцільно, окрім ймовірності їх появи p , характеризувати значенням похибки, що ними вноситься. Такою оцінкою є математичне сподівання похибки, що обумовлена параметричними відмовами

$$M(\Delta Q_{INL}) = \sum_{i=1}^l \Delta Q_i q_i,$$

де q_i – ймовірність відмови i -го елемента, ΔQ_i – абсолютне відхилення ваги розряду.

Для більшості структурних схем перетворювачів інформації всі елементи, відмови яких приводять до втрати точності кодування, відносяться до того або іншого розряду. Вважаючи ці відмови незалежними, а ймовірність їх появи однаковою для всіх розрядів, ймовірність одночасної появи відмов в i розрядах перетворювача інформації запишеться у вигляді [2]:

$$p_i = C_n^i q^i p^{n-i},$$

де C_n^i – число можливих сполучень з n по i , із врахуванням закону формування числа в позиційних системах числення із ваговою надлишковістю. Так при основі системи числення $\alpha = 1,618$ між двома одиницями в коді числа обов'язково є один нуль. Діапазон перетворення $D_{ПЕР}$ (максимальне число, яке можна представити в мінімальній формі коду) чисел при парній кількості розрядів буде визначатись як

$$D_{ПЕР} = Q_0 + Q_1 + Q_3 + \dots + Q_{2i+1} + \dots + Q_{n-1} = \alpha^n - 1, \text{ де } i = 1, 2, 3, \left(\frac{n}{2}\right) - 1.$$

При непарній кількості розрядів матимемо вираз

$$D_{ПЕР} = Q_1 + Q_2 + Q_4 + \dots + Q_{2i} + \dots + Q_{n-1} = \alpha^n - 1, \text{ де } i = 1, 2, 3, \frac{n-1}{2}.$$

Тому якщо похибка, що вноситься відмовою в розряд, дорівнює його вазі, то при вагах розрядів у позиційних системах числення із ваговою надлишковістю з $\alpha = 1,618$:

$$M(\Delta Q_{INL}) = (Q_0 + Q_1 + Q_3 + \dots + Q_{n-1})q p^{n-1} + [(Q_0 + Q_1) + (Q_0 + Q_3) + \dots + (Q_0 + Q_{n-1}) +$$

$$+ (Q_1 + Q_3) + (Q_1 + Q_5) + \dots + (Q_1 + Q_{n-1}) + \dots + (Q_{n-3} + Q_{n-1})]q^2 p^{n-2} + \dots + Q_{n-1}q^n.$$

Розглядаючи структуру кожного з членів цього виразу, можна помітити, що коефіцієнти при кожному з членів $q^i p^{n-i}$ включають в себе ваги розрядів стільки раз, скільки сполучень можна скласти з ваг $(n-1)$ по $(i-1)$ з урахування закону формування числа в НПСЧ, тобто його значення дорівнює $D_{ПЕР} C_{n-1}^{i-1}$. Тому

$$M(\Delta Q_{INL}) = D_{ПЕР}(C_{n-1}^0 q p^n - 1 + C_{n-1}^1 q^2 p^{n-2} + \dots + C_{n-1}^{n-2} q^{n-1} p + C_{n-1}^{n-1} q^n) =$$

$$= D_{ПЕР}q(C_{n-1}^0 p^n - 1 + C_{n-1}^1 q^1 p^{n-2} + \dots + C_{n-1}^{n-2} q^{n-2} p + C_{n-1}^{n-1} q^{n-1}) = D_{ПЕР}q(q + p)^{n-1} = D_{ПЕР}q.$$

Якщо скористатися не абсолютною похибкою, а відносною $\delta Q_{INL} = \Delta Q_{INL} / D_{ЗОБ}$, де для p -чисел Фібоначчі $D_{ЗОБ} = \alpha^{n+p} - \alpha^p$ - діапазон зображення, максимальне число, яке можна представити надлишковим кодом, то

$$M(\delta Q_{INL}) = M\left(\frac{\Delta Q_{INL}}{D_{ЗОБ}}\right) = \frac{D_{ПЕР}q}{D_{ЗОБ}} = \frac{\alpha^n - 1}{\alpha^{n+p} - \alpha^p} q.$$

Так, для двійкової системи числення $p = 0$ і математичне сподівання похибки за рахунок відмов елементів окремих розрядів перетворювача інформації дорівнює ймовірності відмови одного з розрядів. Щодо ПФІ, побудованих на основі позиційних систем числення із ваговою надлишковістю, то математичне сподівання похибки буде залежати від основи системи числення. Наприклад, для «золотої пропорції» при $p = 1$ і $\alpha = 1,618$:

$$M(\delta Q_{INL}) = \frac{\alpha^n - 1}{\alpha^{n+1} - \alpha^1} q = \frac{\alpha^n - 1}{\alpha \cdot \alpha^n - \alpha} q \approx \frac{1}{\alpha} q. \quad (2)$$

Змінення ваги розряду із врахування варіації температури підпорядковується закону [7, 14]:

$$Q_i \approx Q_{i\ id} (1 + \mu_{Q_i} (T - T_0)) = Q_{i\ id} (1 + \mu_{Q_i} \Delta T), \quad (3)$$

де $\mu_{Q_i} = \frac{Q_{i1} - Q_{i0}}{Q_{i0} (T_{Q_{i1}} - T_{Q_{i0}})}$ - температурний коефіцієнт. Враховуючи (1), реальна вага розряду із врахуванням технологічного допуску буде визначатися як

$$Q_i = Q_{i\ id} \pm \Delta Q_i = Q_{i\ id} \pm \delta Q_i \cdot Q_{i\ id}. \quad (4)$$

Зіставляючи (3) і (4), маємо $Q_{i\ id} (1 + \delta Q_i) = Q_{i\ id} (1 + \mu_{Q_i} \Delta T)$, $1 + \delta Q_i = 1 + \mu_{Q_i} \Delta T$, звідки

$$\Delta T = \frac{\delta Q_i}{\mu_{Q_i}}.$$

Змінення ваг розрядів АЦП в часі підпорядковується співвідношенню [7, 14]:

$$Q_i \approx Q_{i\ id} (1 + \nu_{Q_i} \Delta t),$$

де $\nu_{Q_i} = \frac{Q_{it_1} - Q_{it_0}}{Q_{it_0} (t_1 - t_0)}$ - коефіцієнт часової нестабільності. Виконуючи аналогічні операції маємо:

$$\Delta t = \frac{\delta Q_i}{\nu_{Q_i}}.$$

Слід зазначити, що під час змінення температури ΔT або функціонування ПФІ протягом часу Δt може з'явитись параметрична відмова з ймовірністю p (рис. 6). З урахуванням (2) можна стверджувати, що при цьому збільшується ймовірність появи похибки перетворення АЦП, значення якої виходить за межі допуску. Відповідно, для її усунення необхідно виконувати самокалібрування ваг розрядів перетворювача.

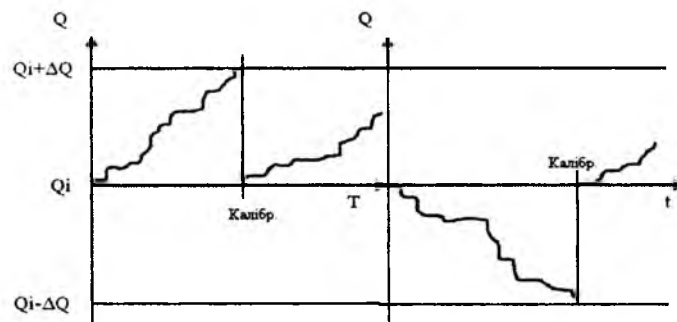


Рисунок 6 – Поява похибки АЦП при зміні температури T і в процесі старіння

Висновки

1. Визначено вплив параметричних відмов на похибки перетворення багаторозрядних ЦАП і АЦП із ваговою надлишковістю. Показано, що вихід параметра за зону допуску виникає внаслідок температурного впливу, часового дрейфу параметрів аналогових вузлів ПФІ і визначається можливостями технології і часовою нестабільністю матеріалів, з яких виготовляються аналогові вузли схеми.

2. Вибрано модель параметричної надійності ПФІ, що пов'язує підсумкові похибки перетворення із урахуванням відмов ваг окремих розрядів. Показано, що значення математичного сподівання похибки за рахунок відмов елементів окремих розрядів перетворювача інформації, що побудований з використанням позиційних систем числення із ваговою надлишковістю, менше ймовірності відмови одного розряду і залежить від α .

3. Отримано аналітичний вираз для оцінювання міжкалібрувального інтервалу, в межах якого параметричні відмови не призведуть до появи похибки в характеристиці перетворення багаторозрядного ПФІ із ваговою надлишковістю.

Список літератури

1. Грушвицкий Р.И. Мурсаев А.Х., Смоллов В.Б. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем. – Л.: Энергоатомиздат., 1989. – 160 с.
2. Полупроводниковые кодирующие и декодирующие преобразователи / Под ред. В. Б. Смолова и Е. А. Смирнова. – Л.: Энергия, 1967. – 312с.
3. Phillip E. Allen, Douglas R. Holberg. CMOS Analog Circuit Design. Second Edition. - New York: Oxford University Press, 2002. - 797 p.
4. Азаров О.Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення. Монографія.–Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 260с.
5. Азаров О.Д., Архипчук О.А., Захарченко С.М. Високолінійні порозрядні АЦП із ваговою надлишковістю для систем реєстрації і оброблення сигналів. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 125 с.
6. Захарченко С.М., Азаров О.Д., Харьков О.М. Самокалібровані АЦП із накопиченням заряду на основі надлишкових позиційних систем числення. Монографія / Під заг. ред. О.Д. Азарова. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2005. – 235 с.
7. Alan Hasting. The art of analog layout. – New Jersey: Prentice Hall, 2001. – p. 539.
8. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
9. ДСТУ 3433-96 Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення. Держстандарт України, Київ.
10. Стахов А.П., Азаров А.Д., Марценюк В.П., Моисеев В.И., Стейскал В.Я. Высокопроизводительные преобразователи информации на основе избыточных систем счисления. – К.: УМК ВО, 1988. – 180 с.
11. Азаров О.Д., Кадук О.В. Характеристика перетворення порозрядного АЦП, що самокалібрується, побудованого на неточному ЦАП із ваговою надлишковістю. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2007, № 3 (10). – С. 8-18.
12. Азаров О.Д., Кадук О.В. Стратегії самокалібрування характеристики перетворення АЦП порозрядного кодування із ваговою надлишковістю // Вісник ВПІ. – 2008. – №1 (76). – С. 102 – 110.
13. Сотсков Б.С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. – М.: «Высшая школа», 1970. – 270 с.
14. Никулин С.М. Надежность элементов радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1979.– 80с.

Відомості про авторів

Азаров Олексій Дмитрович – д.т.н., професор, директор інституту інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, завідувач кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, тел. 51-32-93.

Кадук Олександр Володимирович – аспірант кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.