

Вимірювальна техніка і метрологія. – Л.: Вища школа, 2001. – Вип. 58. – С. 26–32. 3. Мичуда З. Р. Логарифмічні АЦП з накопиченням заряду в активних конденсаторних комірках. Моделювання впливу паразитних ємностей // Вимірювальна техніка і метрологія. – Л.: Вища школа, 2002. – Вип.59. – С. 81–87. 4. Матецька Л. А., Мичуда З. Р. Логарифмічний аналого-цифровий перетворювач з накопиченням заряду на послідовно включених конденсаторах // Комп'ютерні технології друкарства. – Л.: Українська академія друкарства. – 2000. – № 5. – С. 36–43. 5. Мичуда З. Р. Аналоговий ключ / Мичуда З. Р. // Автоматика, вимірювання та керування. – Л.: ДУЛП, 1998. – Вип. 356. – С.77–83.

УДК 621.374

Л. В. Мороз¹, Н. М. Лужецька¹, А. Я. Горпенюк²
Національний університет “Львівська політехніка”
¹кафедра безпеки інформаційних технологій,
²кафедра захисту інформації

ОБЧИСЛЮВАЧ ОБЕРНЕНО ПРОПОРЦІЙНОЇ ФУНКЦІЇ НА ЧИСЛО-ІМПУЛЬСНОМУ КВАДРАТОРІ

© Мороз Л. В., Лужецька Н. М., Горпенюк А. Я., 2014

Подано результати синтезу та дослідження класичної та конвеєрної структур обчислювача обернено пропорційної функції на число-імпульсному квадраторі. Показано, що максимальна частота роботи конвеєрної структури значно вища за максимальну частоту роботи класичної структури. Точність структури обчислювача на число-імпульсному квадраторі вища за точність відомої структури обчислювача на двох число-імпульсних помножувачах.

The results of classical and conveyor inverse function calculators, based on the pulse-number squarer, synthesis and research are given. Maximal work frequency conveyor structure is considerably higher than maximal work frequency of classic structure. Accuracy of calculator, based on the pulse-number squarer, is higher than the accuracy of known calculator, based on two pulse-number multiplier.

Вступ

Як відомо, число-імпульсні функціональні перетворювачі доцільно застосовувати у випадках, коли вимагається табулювання функції або обчислення однієї й тієї самої функції для значної кількості значень аргументів, або коли значення аргументу функції розгорнуте в часі, як, наприклад, у деяких алгоритмах комп'ютерної графіки, вимірювання, криптоаналізу тощо. За таких умов число-імпульсні функціональні перетворювачі мають істотну перевагу над універсальними перетворювачами за швидкодією. З іншого боку, число-імпульсні функціональні перетворювачі, які будують за принципом цифрового наближення породжуючих диференціальних рівнянь, мають специфічні похибки перетворення і містять зворотні зв'язки, що ускладнює аналіз точності таких перетворювачів, вимагаючи, як правило, їх імітаційного моделювання. Саме за умови уважного структурного та параметричного синтезу число-імпульсних функціональних перетворювачів, їх адекватного і повного імітаційно-математичного моделювання такі перетворювачі за згаданих умов істотно випереджають універсальні перетворювачі за швидкодією. Все це стосується, зокрема, й обчислювача обернено пропорційної функції, який широко застосовується в обчислювальній і

вимірювальній техніці, розроблення й дослідження вдосконаленої число-імпульсної структури якого стосується ця робота.

Аналіз методів число-імпульсного обчислення обернено пропорційної функції

Узагальнюючи методи побудови обчислювачів такого типу, можна зробити висновок, що такі обчислювачі будують за принципом інтегрування що породжують задану функціональну залежність диференціальних рівнянь. Методика синтезу число-імпульсних обчислювачів детально розглянута в [1]. Ця методика містить етап диференціювання заданої функціональної залежності для отримання породжуючого диференціального рівняння, етап декомпозиції цього рівняння в систему рівнянь, для відтворення яких існують базові число-імпульсні блоки, етап композиції для отримання реальної залежності, яку наближено відтворюватиме синтезована число-імпульсна структура, і для визначення початкових умов роботи структури. Зокрема, якщо застосовувати цю методику стосовно обернено пропорційної залежності:

$$z = \frac{1}{x}, \quad (1)$$

можна отримати одне з таких породжуючих диференціальних рівнянь:

$$dz = -\frac{1}{x^2} \cdot dx \quad (2)$$

$$dz = -\frac{z}{x} \cdot dx \quad (3)$$

$$dz = -z^2 \cdot dx \quad (4)$$

Подальша декомпозиція будь-якого з цих рівнянь в систему рівнянь Шеннона не є однозначною. У [3] показано, що диференціальне рівняння (2) можна розкласти в систему рівнянь Шеннона сімома різними способами. Число-імпульсні обчислювачі, побудовані за кожною із цих семи систем, вже ґрунтовно досліджено. Зокрема в [3] досліджено, з пошуком оптимальних початкових умов роботи, число-імпульсні обчислювачі, побудовані за системами (5), (6), – структури на двох число-імпульсних помножувачах.

$$\begin{cases} d\alpha = \frac{z}{N_m} \cdot dz \\ dz = -\frac{\alpha}{N_m} \cdot dx \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} d\alpha = \frac{z}{N_m} \cdot dx \\ dz = -\frac{z}{N_m} \cdot d\alpha \end{cases}. \quad (6)$$

Такі обчислювачі мають необмежений діапазон зміни аргументу. Також показано, що у разі забезпечення оптимальних початкових умов, які можна знайти в процесі імітаційного моделювання, максимальна абсолютна похибка обчислювача, побудованого за системою (6), близька до однієї одиниці молодшого розряду результату (о.м.р.) перетворення. Тобто точність обчислювачів на помножувачах достатньо висока, однак сильно залежить від вибору початкових умов і, як показано далі, її можна покращити.

Разом з тим, проведений аналіз показав, що існує можливість побудови число-імпульсних обчислювачів обернено-пропорційної функції на основі систем рівнянь, які містять ширший набір базових функцій, ніж класична і модифікована системи рівнянь Шеннона. Актуальним та доцільним є розроблення та дослідження структур такого типу. Актуальним є також завдання розроблення і дослідження конвеєрних структур обчислювачів обернено пропорційної функції, які мають значно вищу максимальну частоту роботи порівняно з класичними структурами обчислювача [2].

Розроблення структури обчислювача обернено пропорційної функції на число-імпульсному квадраторі

Очевидно, що обчислювач обернено пропорційної функції можна побудувати не тільки за однією із систем (5), а й безпосередньо за породжуючим диференціальним рівнянням, наприклад, за рівнянням (4). Але для цього необхідний квадратор результату z . Варіантів побудови квадратора є багато. В цій роботі, з метою збереження переваг число-імпульсних перетворювачів, було поставлено задачу побудови обчислювача обернено пропорційної функції саме на число-імпульсному квадраторі. Ставлячи задачу, прогнозували, що такий обчислювач, як і структури, досліджені в [3], матиме безмежний діапазон зміни аргументу завдяки тому, що породжуюче рівняння (4) не містить інтегрального значення аргументу x . Прогнозувалося також, що обчислювач на квадраторі буде точнішим за структури, досліджені в [3], за рахунок зменшення кількості цифрових (заокруглювальних) інтеграторів.

Обчисливши величину:

$$f = z^2, \quad (7)$$

число-імпульсний обчислювач обернено пропорційної функції можна побудувати за рівнянням (4) на одному-єдиному число-імпульсному помножувачі (цифровому інтеграторі). В такому обчислювачі ми, очевидно, отримаємо не dz , а скінченні (одиничні) прирости результату z . Причому ці прирости, відповідно до (4), є від'ємними. За одиничними від'ємними приростами z , враховуючи (7), послідовність необхідних значень f можна отримати за рекурентним рівнянням:

$$f_i = z_i^2 = (z_{i-1} - 1)^2 = z_{i-1}^2 - 2z_{i-1} + 1 = f_{i-1} - 2z_{i-1} + 1.$$

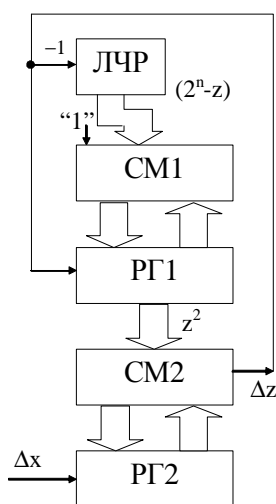


Рис. 1. Структура обчислювача обернено-пропорційної функції на число-імпульсному квадраторі

Це рівняння описує роботу точного число-імпульсного квадратора, який і застосовано в розробленому обчислювачі обернено пропорційної функції. На рис. 1 подано розроблену структуру обчислювача на число-імпульсному квадраторі. В лічильнику ЛЧР, який має n розрядів, підраховуються одиничні прирости результату z відповідно до різницевого рівняння, яке наближає породжуюче диференціальне рівняння (4). На комбінаційному суматорі СМ1 та регістрі РГ1 побудовано число-імпульсний квадратор, який працює відповідно до виведеного рекурентного рівняння. Розрядність СМ1 та РГ1 – $2n$. На комбінаційному суматорі СМ2 та регістрі РГ2 розрядності $2n$ побудовано число-імпульсний помножувач, який наближено відтворює (4).

Роботу синтезованої структури можна наближено описати різницеvim рівнянням:

$$\Delta z = \frac{-z^2 \cdot \Delta x}{2^{2n}}. \quad (8)$$

Якщо наблизити прирости в рівнянні (8) диференціалами, розв'язати отримане диференціальне рівняння і забезпечити виконання початкових умов:

$$z_0 = 2^n, \quad (9)$$

то виявимо, що робота структури на рис. 1 наближено описується залежністю:

$$z = \frac{2^{2n}}{x}. \quad (10)$$

Дослідження класичної та конвексних структур обчислювачів обернено пропорційної функції на число-імпульсних помножувачах

З метою дослідження похибок розробленої структури обчислювача обернено пропорційної функції на число-імпульсному квадраторі було розроблено імітаційну модель такого обчислювача.

Розроблена імітаційна модель передбачає можливість пошуку оптимального значення початкового вмісту РГ2 (рис. 1), яке забезпечує мінімальну ширину діапазону абсолютної похибки перетворення структури. Такий підхід дає змогу мінімізувати максимальні абсолютні похибки за рахунок введення фіксованої для кожної розрядності корекції результату перетворення. Основні результати дослідження похибок обчислювача (рис. 1) зведено в табл. 1.

Таблиця 1

Похибки розробленого обчислювача

| Розрядність ЛЧР, n | Початковий вміст РГ2 | 2^{2n-1} | Δ_{max} , о.м.р. | Δ_{min} , о.м.р. | Діапазон похибки, о.м.р. |
|--------------------|----------------------|------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 4 | 110 | 128 | 0,565217 | -0,363636 | 0,928854 |
| 5 | 493 | 512 | 0,655172 | -0,363636 | 1,018809 |
| 6 | 1930 | 2048 | 0,627907 | -0,448852 | 1,076759 |
| 7 | 7378 | 8192 | 0,622857 | -0,450505 | 1,073362 |
| 8 | 28101 | 32768 | 0,635556 | -0,481689 | 1,117245 |
| 9 | 2^{17} | 2^{17} | 0,670051 | -0,484661 | 1,154712 |
| 10 | 2^{19} | 2^{19} | 0,679410 | -0,493817 | 1,173227 |
| 11 | 2^{21} | 2^{21} | 0,684043 | -0,495071 | 1,179114 |
| 12 | 2^{23} | 2^{23} | 0,681499 | -0,497638 | 1,179137 |
| 13 | 2^{25} | 2^{25} | 0,683690 | -0,498285 | 1,181975 |
| 14 | 2^{27} | 2^{27} | 0,683013 | -0,499052 | 1,182065 |
| 15 | 2^{29} | 2^{29} | 0,682400 | -0,499373 | 1,181773 |

У табл. 1 подано результати дослідження структур з розрядністю лічильника результату (рис. 1) від 4 до 15. Серед результатів вказано мінімальне і максимальне значення абсолютних похибок перетворення в одиницях молодшого розряду (до корекції) і відповідний діапазон абсолютної похибки перетворення. Ці значення отримано за умови забезпечення вказаного початкового вмісту РГ2. Для розрядностей 4–8 значення похибок найменші, а знайдене під час моделювання значення початкового вмісту РГ2 – оптимальне. Для розрядностей ЛЧР понад 10 (відповідно розрядності інших блоків – більші за 20) повне моделювання обчислювача (рис. 1) з пошуком оптимального вмісту РГ2 стає надто трудомістким. Тому початковим вмістом РГ2 для розрядності n вибране число 2^{2n-1} , яке, як показано в табл. 1 для $n = 4 \dots 8$, близьке до оптимального. Зміст згаданої корекції результату для мінімізації абсолютних похибок розглянемо на прикладі 10-розрядного обчислювача. Мінімальний діапазон похибки для такого обчислювача 1,173227 о.м.р. (табл. 1), що відповідає найменшим максимальним абсолютним похибкам $\pm 0,5866135$ о.м.р. Для досягнення таких значень похибки, як впливає з даних табл. 1, результат обчислення необхідно відкоригувати на величину $0,67941 - 0,5866135 = 0,0927965$. Якщо таку корекцію не здійснювати, доцільно під час моделювання вести пошук таких оптимальних початкових чисел в РГ2, які забезпечують мінімальні значення не діапазону похибки, а власне абсолютної похибки результату [5]. Таке дослідження також проведено, його результати зведено у табл. 2.

Таблиця 2

Результати дослідження похибок обчислювача без корекції

| Розрядність ЛЧР, n | Початковий вміст РГ2 | Δ_{max} , о.м.р. | Δ_{min} , о.м.р. |
|--------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 4 | 35 | 0,5263157 | -0,570552 |
| 5 | 189 | 0,555555 | -0,556701 |
| 6 | 1250 | 0,487179 | -0,600000 |
| 7 | 3790 | 0,637037 | -0,593984 |
| 8 | 22000 | 0,624080 | -0,625570 |
| 9 | 84000 | 0,627376 | -0,623853 |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|----|-----------|-----------|-----------|
| 10 | 350000 | 0,616858 | -0,630501 |
| 11 | 1460000 | 0,622351 | -0,633014 |
| 12 | 5800000 | 0,632164 | -0,636332 |
| 13 | 24000000 | 0,633200 | -0,637902 |
| 14 | 96500000 | 0,6304215 | -0,637602 |
| 15 | 386000000 | 0,6319727 | -0,637376 |

Отримані результати дослідження обчислювача на число-імпульсному квадраторі (табл. 1, 2) свідчать, що точність такого обчислювача вища за точність структури на двох число-імпульсних помножувачах, дослідженої в роботі [3]. Адже абсолютна похибка перетворення структури, дослідженої в [3], досягає значень $\pm 0,9$ о.м.р.

Щоб підвищити максимальну частоту роботи обчислювача обернено пропорційної функції, розроблену структуру (рис. 1) реалізовано на конвеєрних структурних елементах [2]. Для дослідження похибок такої конвеєрної структури розроблено її імітаційну модель із застосуванням моделей конвеєрних структурних елементів, запропонованих у роботі [4]. Під час дослідження застосовувалась також вдосконалена методика моделювання конвеєрних число-імпульсних функціональних перетворювачів, запропонована в роботі [4].

На рис. 2 подано графік абсолютної похибки перетворення конвеєрної структури обчислювача на число-імпульсному квадраторі з 15-розрядним конвеєрним лічильником результату. За такої розрядності ЛЧР розрядність інших конвеєрних блоків обчислювача становитиме 30 двійкових розрядів. Результати дослідження (рис. 2) показують, що максимальні значення абсолютної похибки перетворення такої структури дорівнюють ± 15 о.м.р. результату перетворення, причому ці максимальні значення спостерігаються на самому початку діапазону перетворення. Для конвеєрної порозрядної структури зі зворотним зв'язком це мінімальні значення похибки перетворення, яких можна досягти. Причому, як показано у [2], таке збільшення абсолютної похибки перетворення в конвеєрній структурі з надлишком компенсується її істотним виграшем в частоті роботи порівняно з класичною число-імпульсною обчислювальною структурою.

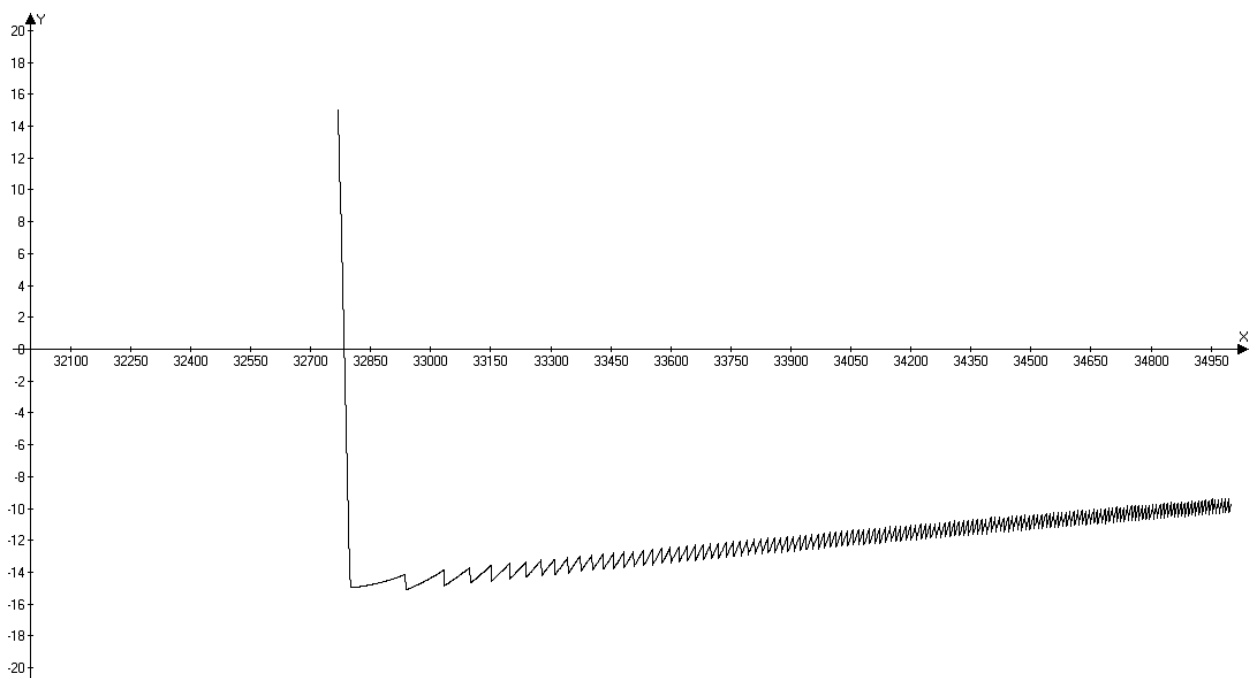


Рис. 2. Графік абсолютної похибки перетворення 15-розрядного конвеєрного обчислювача

Для порівняння також розроблено конвеєрну структуру обчислювача на двох число-імпульсних помножувачах, побудовану за системою (6). Для її дослідження було складено імітаційну модель із застосуванням моделей базових вузлів і методик, запропонованих у [4]. На рис. 3, а подано графік абсолютної похибки перетворення 6-розрядного варіанта такої структури за нульових початкових вмістів регістрів помножувачів. На рис. 3, б – результати моделювання того ж 6-розрядного варіанта конвеєрного обчислювача за знайдених оптимальних значень вмісту обох регістрів. Аналіз отриманих результатів і їх порівняння з результатами дослідження конвеєрного обчислювача на квадраторі показує, що точність конвеєрного обчислювача на квадраторі є значно вищою – адже навіть в 15-розрядному варіанті такого обчислювача похибка менша за похибку 6-розрядного конвеєрного обчислювача на двох помножувачах.

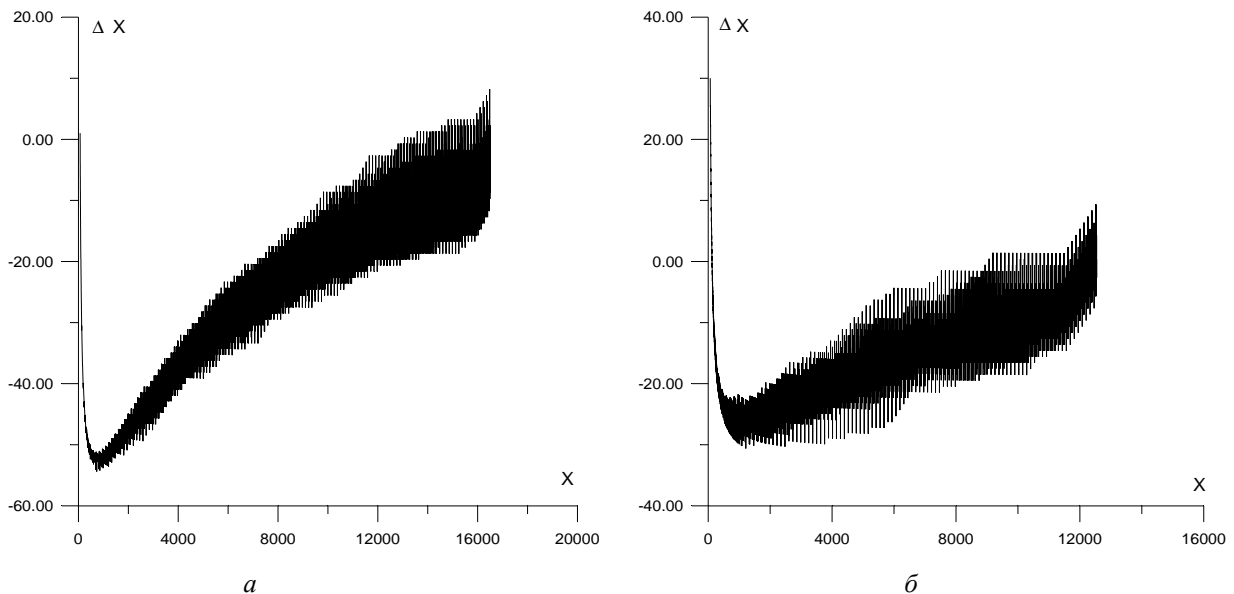


Рис. 3. Графіки абсолютних похибок 6-розрядного конвеєрного обчислювача обернено-пропорційної функції на двох число-імпульсних помножувачах з неоптимізованими (а) та оптимальними (б) початковими умовами роботи

Висновки

У роботі запропоновано число-імпульсну структуру обчислювача обернено пропорційної функції на одному число-імпульсному помножувачі та число-імпульсному квадраторі. Розглянуто класичну та конвеєрну структури такого обчислювача. Для порівняння розроблено також конвеєрну структуру обчислювача на двох число-імпульсних помножувачах. За допомогою розроблених імітаційних моделей виконано дослідження класичного та конвеєрного варіантів обчислювача. Результати виконаних досліджень свідчать про вищу точність запропонованої структури порівняно з відомим варіантом обчислювача на двох число-імпульсних помножувачах. Також результати досліджень дали змогу виявити оптимальні початкові умови роботи запропонованого обчислювача, за яких досягаються кращі показники точності.

1. Дудикевич В. Б. Число-імпульсні функціональні перетворювачі [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Дудикевич Валерій Богданович. – Львів, 1991. 2. Горпенюк А. Я. Принципи побудови конвеєрних базових вузлів число-імпульсних вимірювальних перетворювачів [Текст, рисунки] / Горпенюк А. Я. // Контроль і управління в технічних системах (КУТС-97): книга за матеріалами конференції: Том 2. Універсум-Вінниця. – 1997. – С. 137–140. 3. Горпенюк А. Я. Число-імпульсний функціональний блок широкодіапазонного цифрового частотоміра [Текст] / Горпенюк А. Я., Дудикевич В. Б., Лагун А. Е. // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. “Автоматика, вимірювання та керування”. – 2004. – № 500. – С. 81–88. 4. Горпенюк А. Я. Імітаційне моделювання конвеєрних

число-імпульсних функціональних перетворювачів [Текст] / Горпенюк А. Я., Дудикевич В. Б., Лужецька Н. М. // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. “Автоматика, вимірювання та керування”. – 2005. – № 530. – С. 66–75. 5. Стахів М. Ю. Корекція похибок число-імпульсних функціональних перетворювачів / М. Ю. Стахів, Л. В. Мороз, Р. І. Стахів // II Міжнародна науково-практична конференція “Сучасні наукові дослідження – 2006”. – Дніпропетровськ, 20–28 лютого 2006 р. – С. 34 – 38.

УДК 621.317.7

Р. В. Кочан¹, О. В. Кочан², Г. І. Клим¹, Н. Є. Гоц³

¹Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра спеціалізованих комп’ютерних систем

²Тернопільський національний економічний університет,
НДІ інтелектуальних комп’ютерних систем

³Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра метрології стандартизації та сертифікації

КОМБІНОВАНИЙ МЕТОД КОРЕКЦІЇ НЕЛІНІЙНОСТІ ДВОДІАПАЗОННИХ АЦП

© Кочан Р. В., Кочан О. В., Клим Г. І., Гоц Н. Є., 2014

Розроблено метод формування тестових точок для визначення та корекції інтегральної нелінійності багаторозрядних АЦП, що використовують багаторезисторний подільник напруги з усередненням спадів напруги на всіх резисторах. Досліджено вплив похибки опору резисторів багаторезисторного подільника та випадкової похибки АЦП на невиключену похибку корекції інтегральної нелінійності.

Ключові слова: інтегральна нелінійність, невиключена похибка, багаторезисторний подільник напруги.

There is developed method of testing points generation for identification and correction of integral nonlinearity of high performance ADC. The developed method is based on averaging all voltages of multi-resistors voltage divider. It is investigated influence of resistors' error and random error of ADC on residual error of integral nonlinearity correction for method based on multi-resistor divider.

Key words: Integral Nonlinearity, Residual Error, Multi-Resistor Voltage Divider.

Вступ

Поширення засобів обчислювальної техніки та алгоритмів цифрового опрацювання сигналів привело до того, що аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) стали необхідним компонентом сучасних вимірювальних систем, а їх метрологічні характеристики часто визначають характеристики систем загалом. Особливо це актуально у системах вимірювання електричних величин. Тому покращення параметрів АЦП є актуальним завданням.

Огляд літературних джерел

Нішу прецизійних АЦП напруги постійного струму зайняли перетворювачі на базі сигма-дельта-модулятора (СДМ) [1, 2]. Їх високу точність забезпечують структурно-алгоритмічні методи