

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

БОЙКО ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 681.3

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ЦИКЛІЧНИХ АЦП НА ОСНОВІ
ВАГОВОЇ НАДЛИШКОВОСТІ**

Спеціальність 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2013

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
ЗАХАРЧЕНКО Сергій Михайлович,
Вінницький національний технічний університет,
доцент кафедри обчислювальної техніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
МИЧУДА Зіновій Романович,
Національний університет «Львівська політехніка», професор
кафедри комп'ютеризованих систем автоматики.

доктор технічних наук, професор
КИЧАК Василь Мартинович,
Вінницький національний технічний університет, директор
інститут радіотехніки, зв'язку та приладобудування.

Захист відбудеться «22» лютого 2013 р. о 12.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий «21» січня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. А. Лужецький

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Цифрові технології все більше проникають у побут людей. Ключовими елементами сучасної електроніки є аналого-цифрові перетворювачі. Одним із видів перетворювачів форми інформації (ПФІ) є АЦП послідовного наближення, які з одного боку, мають високу точність, до 14-18 розрядів, а з іншого – досить високу швидкодію, що пояснює інтерес фахівців до цих пристроїв. До цього класу перетворювачів відносяться також циклічні АЦП, які є основою для побудови конвеєрних АЦП, крім того їх використовують як калібрувальні АЦП. Перевагами циклічних АЦП є те, що вони мають просту структуру, досить просто реалізуються в інтегральному виконанні, характеризуються низькою споживаною потужністю та незалежністю аналогової частини перетворювача від основи системи числення. Проте точність циклічного АЦП значно залежить від точності виконання кожним блоком своїх функцій, оскільки похибки накопичуються і циркулюють від циклу до циклу.

У теорії аналого-цифрового перетворення існує кілька окремих підходів для коригування похибок ваг розрядів ПФІ і характеристики перетворення, а саме: технологічні і схемотехнічні прийоми, методи самокоригування для двійкових АЦП, а також методи самоконтролю і самокалібрування для АЦП із ваговою надлишковістю. Перспективним підходом, що дозволяє досягнути зменшення похибки перетворення уникнувши фізичного впливу на елементи схеми і введення додаткових блоків, є використання методів самокоригування і самокалібрування ваг розрядів і характеристики перетворення в цілому, що дозволяє значно (на 1÷2 порядки) зменшити похибки перетворення порівняно з первинними похибками елементів, а також використовувати неточну елементну базу для побудови аналогових вузлів. Регулярне виконання процедури самокалібрування дозволяє підтримувати високі метрологічні характеристики, незважаючи на зниження точності аналогових вузлів, викликаних впливом зміни умов навколишнього середовища або старінням елементів схеми протягом періоду експлуатації. Тому, не зважаючи на появу похибок перетворення, завдяки самокалібруванню, пристрій функціонує в нормальному режимі протягом усього життєвого циклу.

При поєднанні методів самокалібрування та інформаційної надлишковості у вигляді надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ) можна отримати ще кращі результати. Крім того, побудова АЦП на основі НПСЧ є одним із перспективних шляхів комплексного вирішення проблеми підвищення точності та швидкодії АЦП послідовного наближення.

Проте особливості функціонування циклічних АЦП не дають можливості формально перенести відомі підходи підвищення точності та швидкодії АЦП за рахунок використання НПСЧ на пристрої даного класу і потребують додаткових детальних досліджень. Таким чином, наукова задача, пов'язана з підвищенням точності циклічних АЦП за рахунок використання вагової надлишковості є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких наведено в цій дисертаційній роботі, проводилися здобувачем протягом 2009-2012 років згідно з науковим напрямком кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету, а також як виконавцем науково-дослідних програм «Теорія побудови пристроїв та елементної бази прискореного високоточного аналого-цифрового перетворення» (номер державної реєстрації 0105U000664) та «Методи, пристрої та елементна база високопродуктивного, відмовостійкого аналого-цифрового перетворення» (номер державної реєстрації 0111U001114).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення точності циклічних АЦП за рахунок використання вагової надлишковості.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Провести аналіз існуючих методів підвищення точності циклічних АЦП. Проаналізувати можливість застосування вагової надлишковості для підвищення точності циклічних АЦП.

2. Розробити математичні моделі статичних похибок циклічних АЦП, що дозволить оцінити складові загальної похибки перетворення та вплив усіх чинників на точність перетворювача.

3. Дослідити характеристику вхід-вихід циклічного АЦП.

4. Розробити новий метод калібрування циклічних АЦП з ваговою надлишковістю шляхом аналізу характеристики вхід-вихід.

5. Розробити рекомендації щодо побудови циклічних АЦП із ваговою надлишковістю, що самокалібруються.

6. Розробити рекомендації щодо проектування аналогових вузлів для побудови циклічних АЦП із ваговою надлишковістю.

7. Розробити рекомендації користувачу щодо використання програмного забезпечення для моделювання процедури самокалібрування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю, а також здійснити аналіз отриманих результатів.

Об'єктом дослідження є процес функціонування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю.

Предметом дослідження є статичні похибки циклічних АЦП із ваговою надлишковістю та методи їх зменшення.

Методи дослідження базуються на використанні: теорії побудови АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю для аналізу можливості забезпечення проведення процедури цифрового самокалібрування для циклічних АЦП; теоретичних основ електричних схем для дослідження аналогових вузлів АЦП; теорії похибок, а також теорії ймовірності та математичної статистики для розробки моделей статичних похибок перетворення до і після самокалібрування; теорії цифрових автоматів для синтезу схем керування та обчислення результату перетворення; теорії об'єктно-орієнтованого програмування для комп'ютерного моделювання процедури самокалібрування циклічного АЦП із ваговою надлишковістю, а також здійснення аналізу отриманих результатів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

- вперше запропоновано метод самокалібрування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю за аналізом характеристики вхід-вихід АЦП, що дозволило підвищити точність перетворювача;

- вперше запропоновано метод побудови циклічного АЦП із ваговою надлишковістю шляхом введення структурної надлишковості у вигляді калібрувального АЦП малої роздільної здатності та генератора калібрувальних сигналів у базову структуру, що дозволило підвищити точність перетворення;

- набув подальшого розвитку метод аналізу характеристики вхід-вихід АЦП із ваговою надлишковістю, який, на відміну від існуючого дозволив визначити зони заборонених кодових комбінацій, що дало змогу розрахувати робоче значення основи системи числення перетворювача;

- отримала подальшого розвитку узагальнена математична модель статичних похибок циклічного АЦП, в якій, на відміну від існуючої, визначено зв'язок між первинними похибками окремих елементів перетворювача та характеристикою вхід-вихід АЦП, що дозволило систематизувати статичні похибки та запропонувати шляхи їх зменшення.

Достовірність отриманих результатів підтверджується збігом результатів, отриманих аналітичними методами, з результатами комп'ютерного моделювання й експериментальних досліджень.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що отримані теоретичні положення дозволили:

- розробити алгоритми калібрування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю;
- запропонувати структурну схему циклічного АЦП із ваговою надлишковістю, що реалізує метод самокалібрування за аналізом характеристики вхід-вихід;
- запропонувати структурну схему циклічного АЦП із ваговою надлишковістю, що включає калібрувальний АЦП;

- розробити рекомендації щодо проектування вузлів аналогової частини циклічного АЦП із ваговою надлишковістю;
- розробити програмне забезпечення для моделювання процесу самокалібрування циклічного АЦП із ваговою надлишковістю.

Метод калібрування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю шляхом аналізу передатної характеристики та схемотехнічні рішення побудови його цифрових та аналогових блоків впроваджено в Інституті електроніки та зв'язку Української академії наук, м. Київ, акт впровадження затверджено 30.07.2012. Математичну модель статичних похибок циклічних АЦП, метод калібрування циклічного АЦП із ваговою надлишковістю шляхом введення структурної надлишковості та програмне забезпечення для моделювання процесу самокалібрування циклічного АЦП із ваговою надлишковістю впроваджено у навчальному процесі на кафедрі обчислювальної техніки у Вінницькому національному технічному університеті під час читання лекцій, проведення лабораторних робіт та курсового проектування з дисциплін: «Комп'ютерна електроніка», «Лінійні інтегральні схеми», «Аналого-цифрова техніка», акт впровадження затверджено 05.07.2012.

Особистий внесок здобувача в роботах, виконаних у співавторстві: запропоновано метод зменшення похибки квантування АЦП із ваговою надлишковістю за рахунок проведення процедури багаторазового калібрування [1], запропоновано алгоритм самокалібрування АЦП та проведено аналіз ефективності даного алгоритму [2], запропоновано метод самокалібрування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю шляхом введення у базову структуру генератора калібрувальних сигналів та допоміжного калібрувального АЦП [3], досліджено характеристику вхід-вихід циклічного АЦП із ваговою надлишковістю та розроблено алгоритм фонових калібрувань [4], запропоновано узагальнену математичну модель статичних похибок циклічного АЦП, в якій визначено зв'язок між первинними похибками окремих елементів перетворювача та характеристикою вхід-вихід АЦП і систематизовано статичні похибки циклічного АЦП [5], запропоновано алгоритм самокалібрування АЦП та проведено аналіз ефективності даного алгоритму [6], запропоновано метод самокалібрування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю шляхом введення у базову структуру генератора калібрувальних сигналів та допоміжного калібрувального АЦП [7], запропоновано метод калібрування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю на основі статистики дозволених комбінацій, що входять до характеристики вхід-вихід АЦП [8], запропоновано метод реалізації циклічного АЦП на основі базових структур реалізації блоків перетворювача [9], запропоновано узагальнену математичну модель статичних похибок циклічного АЦП, в якій визначено зв'язок між первинними похибками окремих елементів перетворювача та характеристикою вхід-вихід АЦП та систематизовано статичні похибки циклічного АЦП [10], запропоновано математичну модель способу аналого-цифрового перетворення [11], запропоновано структуру генератора калібрувальних сигналів пристрою аналого-цифрового перетворення [12], запропоновано математичну модель способу аналого-цифрового перетворення [13], запропоновано структуру генератора калібрувальних сигналів пристрою аналого-цифрового перетворення [14], запропоновано схему проміжного каскаду для збільшення точності двотактного симетричного підсилювача струму [15], запропоновано схему проміжного каскаду для збільшення точності двотактного симетричного підсилювача струму [16], запропоновано та реалізовано алгоритм розв'язання рівнянь для визначення робочої системи числення [17].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи було апробовано у доповідях на науково-технічних конференціях:

- «Розробка та дослідження методів цифрового самокалібрування з використанням вагової надлишковості» на дев'ятій міжнародній науково-технічній конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2008)», Вінниця, 2008.
- «Високоточний АЦП із перерозподілом заряду із застосуванням вагової надлишковості» на другій міжнародній науково-практичній конференції «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації», м. Вінниця, 2009.
- «Самокалібрований циклічний АЦП із ваговою надлишковістю» на другій міжнародній конференції «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія», м. Вінниця, 2009;
- «Метод калібрування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю» на десятій міжнародній науково-технічній конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010)», Вінниця, 2010.
- «Метод реалізації циклічного АЦП із ваговою надлишковістю» на третій міжнародній науково-практичній конференції «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації», м. Вінниця, 2011.
- «Аналіз статичних похибок циклічного АЦП із ваговою надлишковістю» на третій міжнародній науково-практичній конференції "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія", м. Вінниця, 2012.
- На трьох щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів Вінницького національного технічного університету за участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниця 2009-2012 років.

Публікації. За підсумками наукових досліджень опубліковано 19 наукових праць, включаючи 5 статей у наукових журналах, що входять до переліку періодичних фахових видань, 6 патентів на корисну модель, 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, 7 праць у збірниках матеріалів та тез доповідей наукових конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, що містять 77 рисунків і 13 таблиць, висновків, списку використаних джерел (181 найменувань) і додатків (2 найменування). Загальний обсяг дисертації складає 174 сторінки, з яких основний зміст викладено на 141 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, зазначено зв'язок з науково-дослідними програмами, планами та темами, сформульовано мету та завдання дослідження, окреслено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, конкретну участь автора, наведено інформацію про впровадження результатів роботи, їх апробацію та публікації.

У **першому розділі** проведено аналіз структури найпростішого циклічного АЦП та алгоритму МакЧарльза, який лежить в основі його роботи. Розглянуто схемотехнічні методи покращення характеристик зазначеного виду перетворювачів та показано, що вони призводять до збільшення апаратних витрат (ускладнення структури АЦП, використання додаткових аналогових вузлів, збільшення площі перетворювача) або до зменшення швидкодії (використання додаткових циклів перетворення, погіршення динамічних характеристик). Наведено характеристики конвеєрних АЦП, побудованих на базі циклічних перетворювачів, а також сучасних циклічних АЦП. Показано, що вони мають середню роздільну здатність 8..13 біт та частоту квантування 10..125 кГц/с, співвідношення сигнал/шум – 60..100дБ, що забезпечує досить високу якість перетворення.

Головним недоліком розглянутих методів самокалібрування є те, що вони виконуються в аналого-цифровій формі, тобто визначений коригуючий код подається на додатковий (або додаткові) цифро-аналоговий перетворювач, який перетворює його на аналогову поправку. Таким чином, виникає необхідність використання досить точних додаткових ЦАП, а процедура введення поправки в деяких випадках призводить до

зменшення швидкодії. Уникнути зазначених недоліків можна шляхом уведення інформаційної надлишковості у формі НПСЧ. Проте алгоритми самокалібрування АЦП на основі НПСЧ неможливо використати у циклічних АЦП, оскільки у алгоритмічних перетворювачах визначається, а, відповідно, і калібрується основа системи числення α , а не вага окремих розрядів, як у відомих алгоритмах.

У **другому розділі** проведено аналіз та вплив статичних похибок циклічних АЦП. Структура циклічного АЦП із ваговою надлишковістю (рис. 1) відрізняється від найпростішої тим, що схема множення підсилює сигнал не вдвічі, а на значення основи системи числення α .

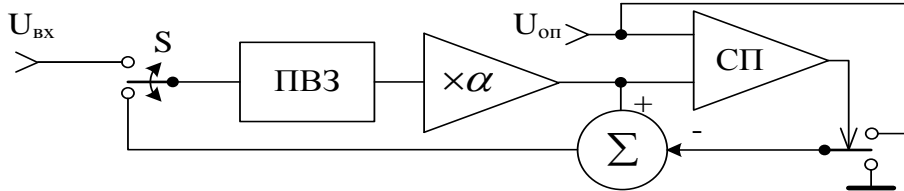


Рисунок 1 – Циклічний АЦП із ваговою надлишковістю

Напряму, що формується за допомогою алгоритму роботи перетворювача на $i+1$ -му кроці можна обчислити як:

$$U_{i+1} = \alpha \cdot U_i + a_i \cdot U_{on}, \quad (1)$$

де α – значення основи системи числення, U_i – аналогова напруга на i -му циклі, $a_i \in \{0,1\}$ – двійкове значення i -го розряду вихідного коду, U_{on} – величина опорної напруги.

Проте, розглянуте співвідношення описує ідеальний процес перетворення циклічного АЦП. Кожен блок, що входить до складу перетворювача вносить власну похибку у вихідний код. Для побудови математичної моделі було розглянуто базові схемні реалізації пристрою вибірки-зберігання, підсилення і віднімання, а також аналогічні блоки з використанням техніки комутованих конденсаторів.

Пристрій вибірки-зберігання (ПВЗ) (рис. 2, а) слугує для фіксації значення аналогового сигналу в певний момент часу: $U_i = U_{ex} \cdot k^{ПВЗ}$, де $k^{ПВЗ}$ – коефіцієнт підсилення ПВЗ. В ідеальному випадку у наведеного ПВЗ $k^{ПВЗ}=1$.

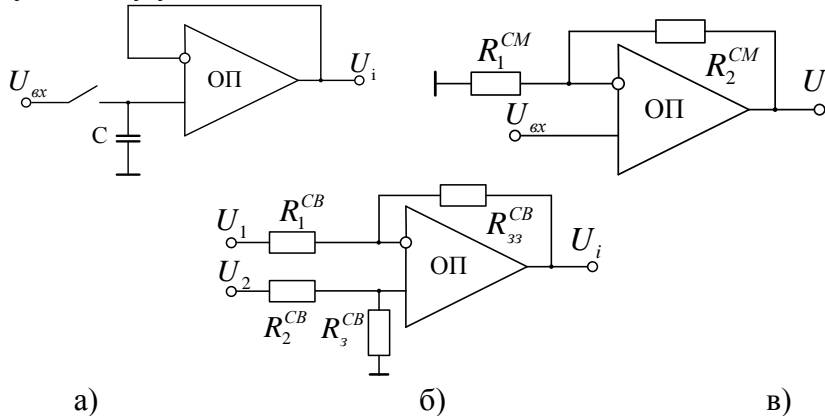


Рисунок 2 – Схема: а) пристрою вибірки-зберігання; б) схеми підсилення сигналу на коефіцієнт α ; в) схеми віднімання

Робота схеми множення сигналу на коефіцієнт α (основу системи числення) (рис. 2, б) визначається співвідношенням:

$$U_i = U_{ex} \cdot \left(1 + \frac{R_2^{CM}}{R_1^{CM}}\right) = U_{ex} \cdot \alpha. \quad (2)$$

Коефіцієнт підсилення схеми становить $k^{CM} = R_2^{CM} / R_1^{CM}$.

Рівняння, що описує роботу схеми віднімання (рис. 2, в) має вигляд:

$$U_i = U_2 \cdot \left(\frac{(R_{33}^{CB} + R_1^{CB}) \cdot R_3^{CB}}{(R_3^{CB} + R_2^{CB}) \cdot R_1^{CB}}\right) - U_1 \cdot \left(\frac{R_{33}^{CB}}{R_1^{CB}}\right) \quad \text{або} \quad U_i = k_1^{CB} \cdot U_2 - k_2^{CB} \cdot U_1, \quad (3)$$

де $k_1^{CB} = \frac{(R_{33}^{CB} + R_1^{CB}) \cdot R_3^{CB}}{(R_3^{CB} + R_2^{CB}) \cdot R_1^{CB}}$ та $k_2^{CB} = \frac{R_{33}^{CB}}{R_1^{CB}}$. В ідеальному випадку $k_1^{CB} = k_2^{CB} = 1$.

Таким чином, з урахуванням вище наведених співвідношень і, відповідно, до розглянутого алгоритму аналогово-цифрового перетворення напруга на виході схеми віднімання, що передається на наступний цикл ідеального процесу перетворення описується виразом:

$$U_{(i+1)} = U_i \cdot (1 + k^{CM}) - U_{on}. \quad (4)$$

Похибка перетворення циклічного АЦП визначається передусім відхиленням аналогових елементів перетворювача від номіналу і накопиченням даних похибок від циклу до циклу як мультиплікативних так і адитивних.

У роботі доведено, що похибка, яку вносить ПВЗ, передусім обумовлена напругою зсуву нуля ОП ($\delta U_{3\text{м}0}^{ПВЗ}$). Отже напругу на $i+1$ -му кроці U'_{i+1} з урахування похибки ПВЗ можна обчислити за допомогою рівняння:

$$U'_{i+1} = U_i \cdot (k^{ПВЗ} + \Delta k^{ПВЗ}) \cdot (1 + k^{CM}) - U_{on}, \quad (5)$$

де $k^{ПВЗ} + \Delta k^{ПВЗ} = 1 - \delta U_{3\text{м}0}^{ПВЗ}$, а похибка, яку вносить ПВЗ у загальну похибку циклічного АЦП визначається співвідношенням:

$$\delta U_{i+1}^{ПВЗ} = \frac{[U_i \cdot (k^{ПВЗ} + \Delta k^{ПВЗ}) \cdot (1 + k^{CM}) - U_{on}] - [U_i \cdot (1 + k^{CM}) - U_{on}]}{U_i \cdot (1 + k^{CM}) - U_{on}}. \quad (6)$$

Похибки отримані на виході схем підсилення сигналу на α і схеми віднімання передусім обумовлені відхиленням резисторів від номіналу та напругою зсуву нуля ОП ($\delta U_{3\text{м}0}^{CM}$ і $\delta U_{3\text{м}0}^{CB}$). Реальна напруга на $i+1$ -му циклі U'_{i+1} схеми підсилення сигналу на основу системи числення α визначається як:

$$U'_{i+1} = U_i \cdot (1 + k^{CM} + \Delta k^{CM}) - U_{on}, \quad (7)$$

де $k^{CM} + \Delta k^{CM} = (1 + \frac{R_2^{CM} + \Delta R_2^{CM}}{R_1^{CM} + \Delta R_1^{CM}}) \cdot (1 - \delta U_{3\text{м}0}^{CM})$.

Загальне рівняння похибки схеми множення має вигляд:

$$\delta U_{i+1}^{CM} = \frac{[U_i \cdot (1 + k^{CM} + \Delta k^{CM}) - U_{on}] - [U_i \cdot (1 + k^{CM}) - U_{on}]}{U_i \cdot (1 + k^{CM}) - U_{on}}. \quad (8)$$

Відповідно, похибки внесені схемою віднімання для кожного із входів Δk_1^{CB} і Δk_2^{CB} можна обчислити за допомогою рівностей:

$$k_1^{CB} + \Delta k_1^{CB} = \frac{((R_{33}^{CB} + \Delta R_{33}^{CB}) + (R_1^{CB} + \Delta R_1^{CB})) \cdot (R_3^{CB} + \Delta R_3^{CB})}{((R_3^{CB} + \Delta R_3^{CB}) + (R_2^{CB} + \Delta R_2^{CB})) \cdot (R_1^{CB} + \Delta R_1^{CB})}, \quad (9)$$

$$k_2^{CB} + \Delta k_2^{CB} = \frac{R_{33}^{CB} + \Delta R_{33}^{CB}}{R_1^{CB} + \Delta R_1^{CB}}. \quad (10)$$

Враховуючи дані вирази, значення реальної напруги на $i+1$ -му циклі U'_{i+1} для схеми віднімання буде знаходитись за співвідношенням:

$$U'_{i+1} = [(k_1^{CB} + \Delta k_1^{CB}) \cdot (U_i \cdot (1 + k^{CM})) - (k_2^{CB} + \Delta k_2^{CB}) \cdot U_{on}] \cdot (1 - \delta U_{3\text{м}0}^{CB}). \quad (11)$$

Похибка схеми віднімання визначається виразом:

$$\delta U_{i+1}^{CB} = \frac{[(k_1^{CB} + \Delta k_1^{CB}) \cdot (U_i \cdot (1 + k^{CM})) - (k_2^{CB} + \Delta k_2^{CB}) \cdot U_{on}] \cdot (1 - \delta U_{3\text{м}0}^{CB}) - [U_i \cdot (1 + k^{CM}) - U_{on}]}{U_i \cdot (1 + k^{CM}) - U_{on}}. \quad (12)$$

Відповідно, напругу, що відповідає вазі розряду з урахуванням усіх видів похибок можна знайти за співвідношенням:

$$U'_{i+1} = [(k_1^{CB} - \Delta k_1^{CB}) \cdot (U_i \cdot (k^{ПВЗ} + \Delta k^{ПВЗ})) \cdot (1 + k^{CM} + \Delta k^{CM}) - U_{on} \cdot (k_2^{CB} - \Delta k_2^{CB})] \cdot (1 - \delta U_{3\text{м}0}^{CB}). \quad (13)$$

Залежність δU_{i+1} циклічного АЦП від номеру розряду за наявності усіх видів похибок обраховується формулою:

$$\delta U_{i+1} = \frac{\left[\left((k_1^{CB} - \Delta k_1^{CB}) \cdot (U_i \cdot (k^{ПВЗ} + \Delta k^{ПВЗ})) \cdot (1 + k^{CM} + \Delta k^{CM}) - U_{on} \cdot (k_2^{CB} - \Delta k_2^{CB}) \right) \cdot (1 - \delta U_{3M0}^{CB}) \right] - \left[U_i \cdot (1 + k^{CM}) - U_{on} \right]}{U_i \cdot (1 + k^{CM}) - U_{on}}, \quad (14)$$

а її графічну інтерпретацію можна побачити на рис. 3.

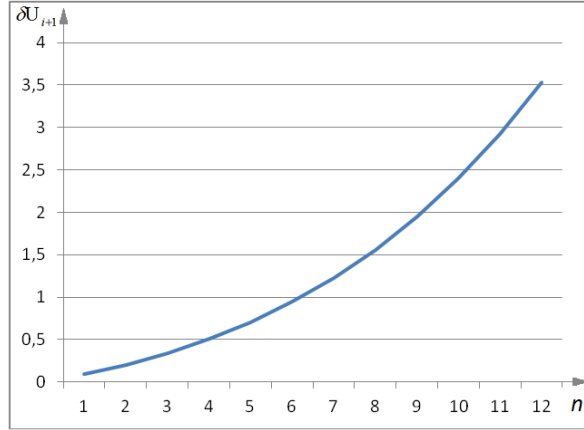


Рисунок 3 – Залежність δU_{i+1} циклічного АЦП від номеру розряду

Після перетворень виразу (13) позначивши як Δ_1 похибки, що вносять блоки у перший доданок і Δ_2 – як похибку другого доданку, можна отримати рівності:

$$\alpha + \Delta_1 = (k_1^{CB} - \Delta k_1^{CB}) \cdot (k^{ПВЗ} + \Delta k^{ПВЗ}) \cdot (\alpha + \Delta k^{CM}) \cdot (1 - \delta U_{3M0}^{CB}), \quad (15)$$

$$1 + \Delta_2 = (k_1^{CB} - \Delta k_2^{CB}) \cdot (1 - \delta U_{3M0}^{CB}), \quad (16)$$

тоді від виразу, що описує ідеальний процес перетворення циклічного АЦП, переходимо до такого виразу:

$$U_{i+1} = (\alpha + \Delta_1) \cdot U_i + (1 + \Delta_2) \cdot a_i \cdot U_{on}, \quad (17)$$

де Δ_1 – похибка, яка впливає на лінійність перетворювача,

Δ_2 – похибка, яка впливає на коефіцієнт нахилу характеристики перетворення.

Для побудови циклічного АЦП на комутованих конденсаторах було обрано варіант побудови, що включає в себе два блоки: пристрій вибірки-зберігання з одночасним множенням (рис 4, а) та схему віднімання на комутованих конденсаторах (рис 4, б).

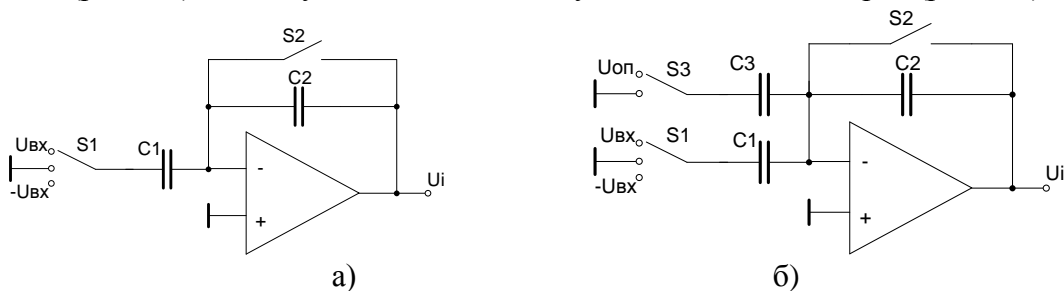


Рисунок 4 – Схема: а) пристрою вибірки-зберігання з одночасним множенням; б) схема віднімання

Функціонування пристрою вибірки-зберігання з одночасним множенням описується співвідношенням:

$$U_i = 2 \cdot U_{ex} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{C_1}{C_2}} \right) \quad \text{або} \quad U_i = (\alpha + \Delta k^{CM}) \cdot U_{ex} \cdot k^{ПВЗ}, \quad (18)$$

де A – коефіцієнт підсилення ОП, Δk^{CM} – похибка неточного множення на α , k^{PB3} – коефіцієнт підсилення ПВЗ.

Основа системи числення α задається рівнянням: $\alpha = 2 \cdot (C_1 / C_2)$.

Роботу схеми віднімання можна описати рівнянням:

$$U_i = U_{ex} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{C_1 / C_2}{A}} \right) - U_{on} \cdot \left(\frac{C_1 + C_3}{C_2} \right) \quad \text{або} \quad U_i = k_1^{CB} \cdot U_{ex} - k_2^{CB} \cdot U_{on}, \quad (19)$$

$$\text{де } k_1^{CB} = \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{C_1 / C_2}{A}} \right), \text{ а } k_2^{CB} = \frac{C_1 + C_3}{C_2}.$$

Враховуючи відхилення від номіналу конденсаторів і вплив напруги зсуву нуля операційного підсилювача рівняння перетворення набудуватимуть вигляду:

- для ПВЗ-схеми підсилення сигналу на α :

$$U_{i+1} = 2U_i \cdot \left(\frac{C_1 \cdot (1 + \delta C_1)}{C_2 \cdot (1 + \delta C_2)} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{(C_1 \cdot (1 + \delta C_1)) / (C_2 \cdot (1 + \delta C_2))}{A}} \right) \times (1 - \delta U_{зм0}^{PB3}) - a_i \cdot U_{on}, \quad (20)$$

$$\text{або: } U_{i+1} = (\alpha + \Delta k^{CM}) \cdot U_i \cdot (k^{PB3} + \Delta k^{PB3}). \quad (21)$$

- для схеми віднімання:

$$U_{i+1} = U_i \cdot \left(\frac{C_1 \cdot (1 + \delta C_1)}{C_2 \cdot (1 + \delta C_2)} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{(C_1 \cdot (1 + \delta C_1)) / (C_2 \cdot (1 + \delta C_2))}{A}} \right) - U_{on} \cdot \left(\frac{C_1 \cdot (1 + \delta C_1) + C_3 \cdot (1 + \delta C_3)}{C_2 \cdot (1 + \delta C_2)} \right) \cdot (1 - \delta U_{зм0}^{CB}), \quad (22)$$

$$\text{або: } U_{i+1} = (k_1^{CB} + \Delta k_1^{CB}) \cdot U_i - (k_2^{CB} + \Delta k_2^{CB}) \cdot U_{on}. \quad (23)$$

Враховуючи усі вище розглянуті види похибок, рівняння вихідної напруги $i+1$ -го циклу перетворення циклічного АЦП можна показати співвідношенням:

$$U_{i+1} = [(k_1^{CB} + \Delta k_1^{CB}) \cdot (U_i \cdot (k^{PB3} + \Delta k^{PB3})) \cdot (\alpha + \Delta k^{CM}) - U_{on} \cdot (k_2^{CB} + \Delta k_2^{CB})] \cdot (1 - \delta U_{зм0}^{CB}). \quad (24)$$

Якщо позначити через Δ_1 похибку, яку вносять блоки у перший доданок і Δ_2 – як похибку другого доданку, отримаємо:

$$\alpha + \Delta_1 = (k_1^{CB} + \Delta k_1^{CB}) \cdot (k^{PB3} + \Delta k^{PB3}) \cdot (\alpha + \Delta k^{CM}) \cdot (1 - \delta U_{зм0}^{CB}), \quad (25)$$

$$1 + \Delta_2 = (k_2^{CB} + \Delta k_2^{CB}) \cdot (1 - \delta U_{зм0}^{CB}), \quad (26)$$

а рівняння перетворення набуває вигляду аналогічного виразу (17).

Аналіз різних видів функціональних блоків, що входять до циклічного АЦП і дослідження процесу утворення похибок даними блоками показав, що рівняння перетворення є ідентичними, незалежно від схемної реалізації. Тому можна зробити висновок, що усі похибки можна класифікувати і віднести їх до адитивних або мультиплікативних, що визначає характер впливу даних складових на характеристику вхід-вихід.

У **третьому розділі** розглянуто методи підвищення точності циклічних АЦП за рахунок використання вагової надлишковості. В АЦП послідовного наближення процес врівноваження відбувається від старших розрядів до молодших, крім того якщо деяка аналогова величина матиме декілька цифрових еквівалентів, то в характеристику вхід-вихід входить та комбінація, в якій увімкнено старший розряд. Тому характеристика вхід-вихід АЦП містить зони багатозначного представлення вхідного сигналу. Відповідно, частина кодових комбінацій, які потрапляють у зону багатозначного представлення, не будуть використовуватись і в подальшому ці комбінації будемо називати «забороненими». Кількість «заборонених» комбінацій залежить від розрядності перетворювача та основи системи

числення. Комбінація буде «забороненою» за умови, що існує «дозволена» комбінація вихідного коду з більшим порядковим номером та меншим значенням $A_{\text{вх}}$:

$$A(N_3^k) \geq A(N_0^l), \quad (27)$$

де $A(N_3^k)$ та $A(N_0^l)$ значення вхідного аналогового сигналу, що відповідає «забороненій» кодовій комбінації з номером k та дозволений кодовій комбінації з номером l відповідно, причому $l > k$.

Для ідентифікації зон використовується номер найстаршого розряду, який гарантовано змінюється при переході від нижньої межі зони до верхньої. Таким чином, центральна зона є зоною $(n-1)$ -го рівня (рис. 5). Зона $(n-2)$ -го рівня складається з двох підзон, розташованих симетрично відносно зони $(n-1)$ -го рівня і т.д. Для зони $(n-1)$ -го рівня номер комбінації верхньої межі буде рівною 2^{n-1} ; для підзон $(n-2)$ -го рівня – 2^{n-2} та $2^{n-2}+2^{n-1}$; для підзон $(n-3)$ -го рівня – 2^{n-3} , $2^{n-3}+2^{n-2}$, $2^{n-3}+2^{n-1}$, $2^{n-3}+2^{n-2}+2^{n-1}$ і т.д.

Як вище зазначалось, саме похибка Δ_l є найбільш критичною, оскільки вона впливає на лінійність перетворювача (змінює значення основи системи числення). Таким чином, процес калібрування полягає у визначенні робочої основи системи числення. Особливістю характеристики вхід-вихід циклічних АЦП є перехід від однієї граничної точки до іншої. Якщо $N_{2^{n-1}-k}$ та $N_{2^{n-1}}$ (рис. 5) дві граничні точки між якими знаходиться k точок, що відповідають «забороненим» комбінаціям для зони $(n-1)$ -го рівня, то справедлива нерівність:

$$A(N_{2^{n-1}-k+1}^3) \geq A(N_{2^{n-1}}^\delta) \geq A(N_{2^{n-1}-k}^\delta). \quad (28)$$

Відповідно, максимальне і мінімальне значення α можна знайти розв'язавши останню нерівність через рівняння:

$$A(N_{2^{n-1}-k}^\delta) = A(N_{2^{n-1}}^\delta), \quad (29)$$

$$A(N_{2^{n-1}-k+1}^3) = A(N_{2^{n-1}}^\delta). \quad (30)$$

Якщо є одна заборонена комбінація, то мають місце співвідношення:

$$N_{2^{n-1}}^\delta = 10..00, \quad (31)$$

$$A(N_{2^{n-1}}^\delta) = \alpha^{n-1}, \quad (32)$$

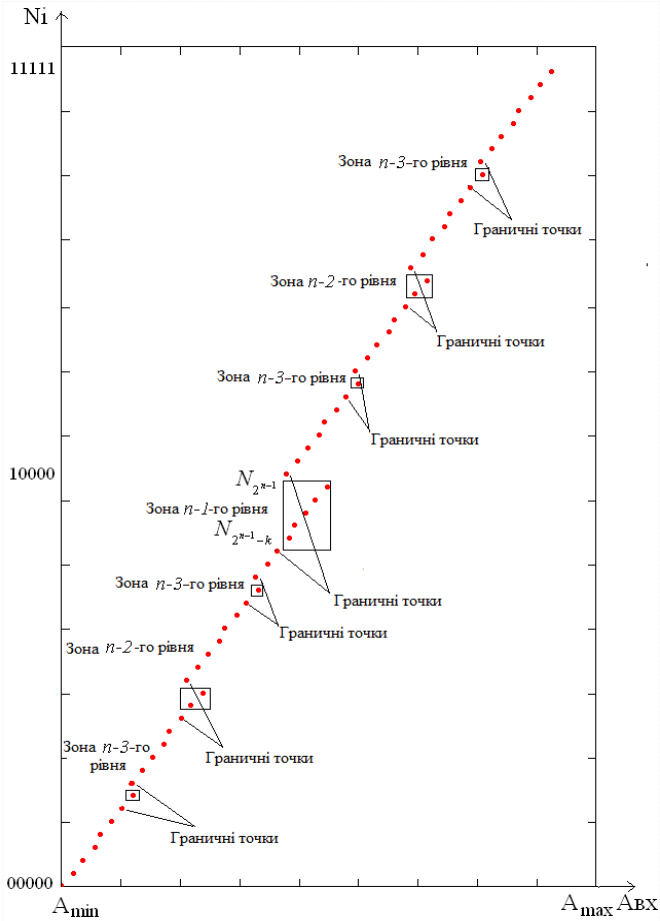


Рисунок 5 – Передатна характеристика 6-ти розрядного АЦП із основою системи числення $\alpha=1,8$

$$N_{2^{n-1}-1}^3 = 01..11, \quad (33)$$

$$A(N_{2^{n-1}-1}^3) = \sum_{i=0}^{n-2} \alpha^i, \quad (34)$$

$$N_{2^{n-1}-2}^0 = 01..10, \quad (35)$$

$$A(N_{2^{n-1}-2}^0) = \sum_{i=1}^{n-2} \alpha^i. \quad (36)$$

Підставивши (31), (33) і (35) в (29-30) отримаємо вирази для розрахунку діапазону значень α :

$$\alpha_{n-1_{\max}}^{n-1} = \sum_{i=0}^{n-2} \alpha_{n-1_{\max}}^i, \quad \alpha_{n-1_{\min}}^{n-1} = \sum_{i=1}^{n-2} \alpha_{n-1_{\min}}^i. \quad (37)$$

Для знаходження робочої основи системи числення необхідно розв'язати останні співвідношення відносно α , а результат осереднити:

$$\alpha_{n-1} = \frac{\alpha_{n-1_{\min}} + \alpha_{n-1_{\max}}}{2}, \quad (38)$$

при цьому похибка визначення α дорівнює $\Delta\alpha_{n-1} = \alpha_{n-1} - \alpha_{id}$, а її максимальне значення відповідно становитиме:

$$\Delta\alpha_{n-1_{\max}} = \frac{\alpha_{n-1_{\max}} - \alpha_{n-1_{\min}}}{2}.$$

У випадку наявності k «заборонених» комбінацій вирази (31) і (33) набувають вигляду:

$$\alpha_{n-1_{\max}}^{n-1} = \sum_{i=0}^{n-2} a_i \alpha_{n-1_{\max}}^i, \quad \text{де } a_i - \text{розряди коду } N_{\emptyset}^{2^{n-1}-k}, \quad (39)$$

$$\alpha_{n-1_{\min}}^{n-1} = \sum_{i=0}^{n-2} b_i \alpha_{n-1_{\min}}^i, \quad \text{де } b_i - \text{розряди коду } N_3^{2^{n-1}-k+1}. \quad (40)$$

Аналогічним чином розраховується α на основі аналізу зони $(n-2)$ -го рівня. В загальному випадку для зони p -го рівня, що містить s_p «заборонених» комбінацій вирази для розрахунку α набувають вигляду:

$$\alpha_{p_{\max}}^p = \sum_{i=0}^{p-1} a_i \alpha_{p_{\max}}^i, \quad \text{де } a_i - \text{розряди коду } N_{\emptyset}^{2^p - s_p}, \quad (41)$$

$$\alpha_{p_{\min}}^p = \sum_{i=0}^{p-1} b_i \alpha_{p_{\min}}^i, \quad \text{де } b_i - \text{розряди коду } N_3^{2^p - s_p + 1}, \quad (42)$$

$$\alpha_p = \frac{\alpha_{p_{\min}} + \alpha_{p_{\max}}}{2}, \quad (43)$$

$$\Delta\alpha_p = \alpha_p - \alpha_{id}. \quad (44)$$

На основі отриманих співвідношень було проведено моделювання та здійснено оцінку точності запропонованого методу калібрування циклічних АЦП за аналізом характеристики вхід-вихід для перетворювачів із різними системами числення та розрядністю.

Похибка визначення основи системи числення для 8- та 14-розрядного циклічного АЦП на основі центральної зони багатозначного представлення зображено на рис. 6.

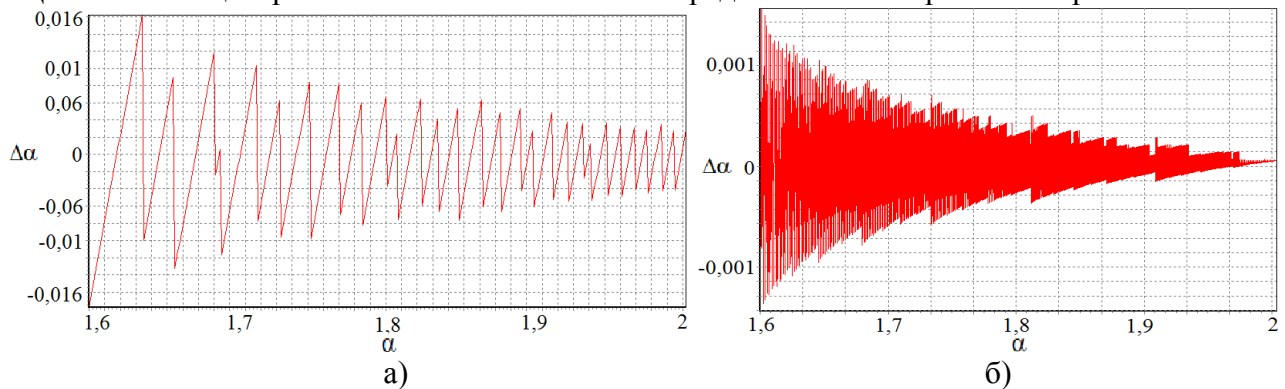


Рисунок 6 – Похибка визначення основи системи числення для: а) 8-розрядного АЦП; б) 14-розрядного АЦП

Очевидно, що максимальна методична похибка спостерігатиметься для кодової комбінації, що містить всі одиниці (рис. 7):

$$\Delta_{max} = \sum_{i=0}^{n-1} (\alpha + \Delta\alpha)^i - \sum_{i=0}^{n-1} \alpha^i. \quad (45)$$

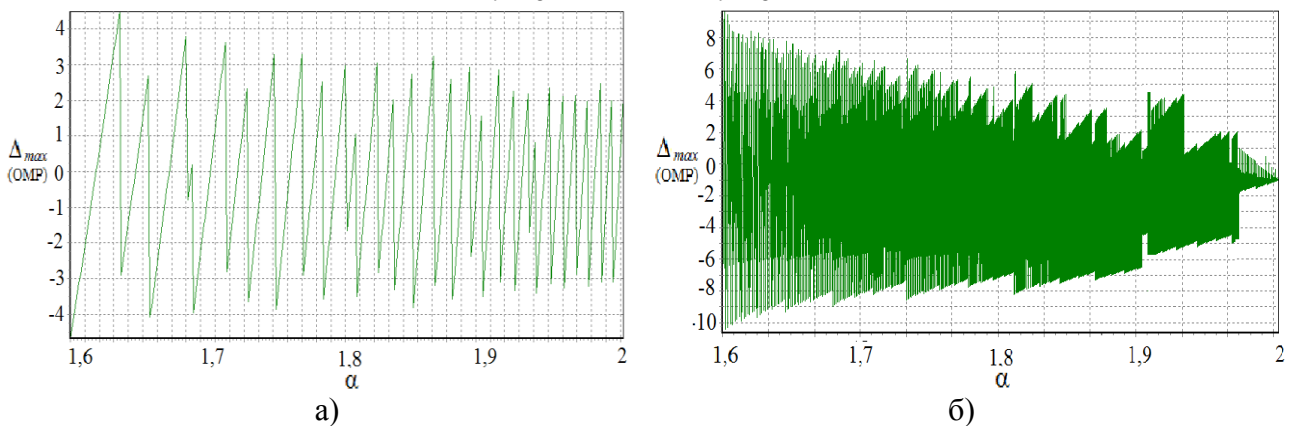


Рисунок 7 – Максимальна методична похибка калібрування АЦП:
а) 8-розрядного; б) 14-розрядного

Запропонований метод калібрування шляхом визначення основи системи числення за аналізу характеристики вхід-вихід АЦП реалізовано у циклічному АЦП із ваговою надлишковістю, що самокалібрується (рис. 8). Схема складається з таких блоків: АК – аналоговий комутатор, БАЦВ – блок аналого-цифрового врівноваження, ГЛСС – генератор лінійного спадаючого сигналу, БФГК – блок фіксації граничних комбінацій, РГК – регістр граничних комбінацій, БІ – блок інвертування, БСЗК – блок сигналізації заборонених комбінацій, БСЗДК – блок сигналізації зникнення дозволених комбінацій, ПЗП – постійний запам'ятовуючий пристрій, ОП – обчислювальний пристрій, ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій. У роботі запропоновано структурні схеми реалізації усіх блоків та алгоритми їх функціонування.

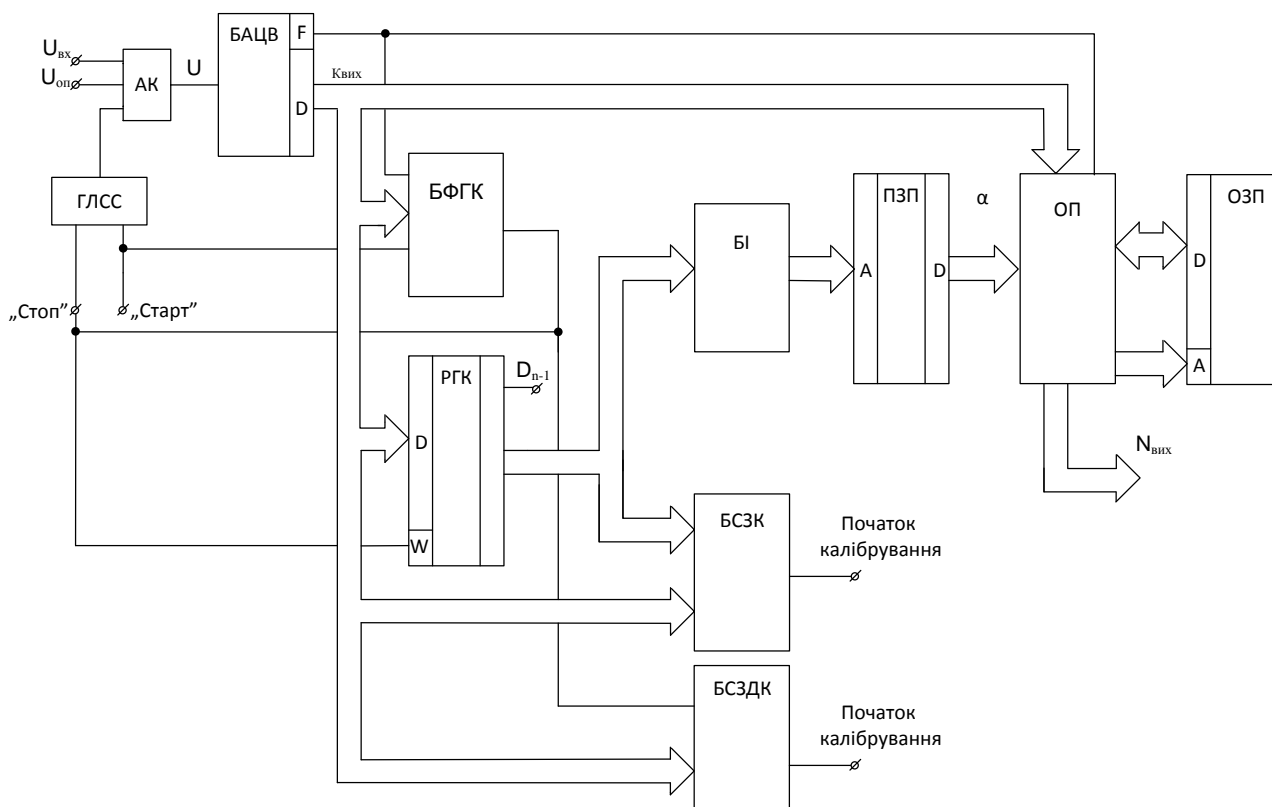


Рисунок 8 – Циклічний АЦП із ваговою надлишковістю, що самокалібується за аналізом характеристики вхід-вихід

Також запропоновано метод цифрового самокалібрування циклічного АЦП із ваговою надлишковістю шляхом використання структурної надлишковості. У базову структуру циклічного АЦП введено додаткові блоки – генератор калібрувальних сигналів (ГКС) і додатковий малорозрядний калібрувальний АЦП (рис. 9).

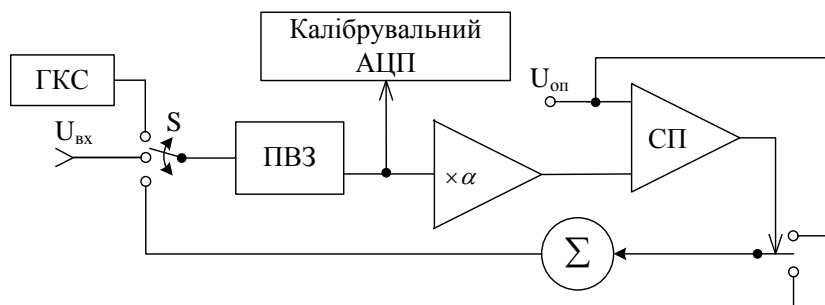


Рисунок 9 – Блок схема циклічного АЦП, що самокалібується шляхом використання структурної надлишковості

ГКС генерує певний сигнал, який перетворюється за допомогою і найпростішого циклічного АЦП, і калібрувального АЦП, після декількох циклів результати цих перетворювачів порівнюються і вносяться відповідні поправки. Якщо кількість ітерацій дорівнює двом, отримає наступні співвідношення:

$$\begin{cases} N(U_{i+1}) = \alpha \cdot N(U_i) + \Delta_2; \\ N(U_{i+2}) = \alpha \cdot N(U_{i+1}) + \Delta_2, \end{cases} \quad (46)$$

де $N(U_i)$ – кодовий еквівалент напруги U_i .

Віднявши дані співвідношення одне від одного автоматично усувається адитивна похибка:

$$N(U_{i+2}) - N(U_{i+1}) = \alpha \cdot N(U_{i+1}) - \alpha \cdot N(U_i). \quad (47)$$

А значення робочої системи числення визначається за допомогою виразу:

$$\alpha' = \frac{N(U_{i+2}) - N(U_{i+1})}{N(U_{i+1}) - N(U_i)}, \quad (48)$$

де $\alpha' = \alpha + \Delta_1$.

Підвищити точність визначення α можна двома шляхами:

1. збільшити розрядність обох АЦП;
2. збільшити кількість сигналів від ГКС.

Враховуючи особливості запропонованого підходу, тривалість процедури калібрування не є критичною, тому для зменшення розрядності калібрувального АЦП і з метою зменшення похибки квантування пропонується здійснювати процедуру багаторазового калібрування (збільшити кількість сигналів від ГКС – r), а результат осереднити за співвідношенням:

$$\alpha' = \frac{\sum_{i=1}^r \alpha_i'}{r}. \quad (49)$$

У **четвертому розділі** сформульовано рекомендації щодо проектування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю. Розроблено структурні та принципові схеми аналогових вузлів перетворювача, зокрема: пристрій вибірки-зберігання та двотактні симетричні підсилювачі постійного струму (рис. 10а) для реалізації схем підсилення та віднімання. Розглянуто різні можливості реалізації циклічних АЦП із ваговою надлишковістю на базі ПЛІС та мікроконтролерів і запропоновано один із способів побудови із використанням мікроконтролера ATmega8 (рис.10б).

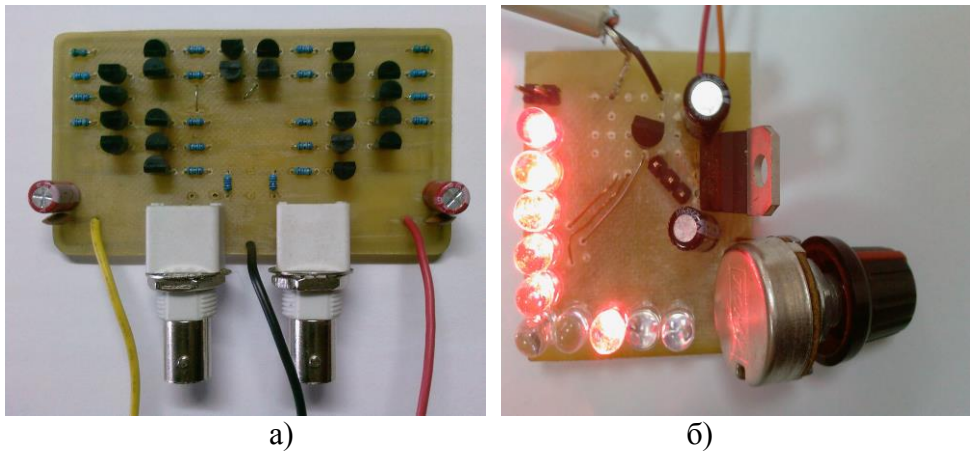


Рисунок 10 – Макет: а) аналогової частини циклічного АЦП; б) циклічного АЦП із ваговою надлишковістю на базі мікроконтролера ATmega8

Використання запропонованих високолінійних схем аналогових вузлів АЦП дозволить додатково покращити характеристики перетворення.

Розроблено програмне забезпечення для моделювання процедури калібрування циклічного АЦП із ваговою надлишковістю шляхом визначення основи системи числення за аналізом характеристики вхід-вихід. Воно дозволяє визначити зв'язок між кількістю заборонених комбінацій в центральній зоні багатозначного представлення, розрядністю перетворювача та його основою системи числення, а отримані дані використати у режимі основного перетворення та оцінити точність запропонованого методу калібрування.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновано методи підвищення точності циклічних АЦП за рахунок використання вагової надлишковості. Отримані наукові положення є внеском у подальший розвиток теорії аналого-цифрового і цифроаналогового перетворення на основі

позиційних систем числення із ваговою надлишковістю, що пов'язаний із створенням високоточних АЦП порозрядного кодування.

Основні результати досліджень такі:

1. Здійснено аналіз існуючих методів підвищення точності циклічних АЦП, в тому числі за рахунок покращення технології та структурної надлишковості і показано, що вони призводять до ускладнення структури АЦП, підвищення вимог до вузлів перетворювача і зменшення швидкодії. Показано, що актуальним питанням є розробка нових методів підвищення точності циклічних АЦП, в тому числі за рахунок використання методу цифрового самокалібрування із використанням вагової надлишковості, оскільки вона дозволяє отримати досить високі метрологічні характеристики навіть при використанні низькоточних аналогових вузлів.

2. Запропоновано метод самокалібрування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю за аналізом характеристики вхід-вихід АЦП, що дозволяє підвищити точність перетворювача принаймні в 2 рази порівняно із відомими підходами. Розроблений метод дозволяє визначити робоче значення основи системи числення циклічного АЦП для усіх зон «заборонених» комбінацій і доведено, що найінформативнішою є центральна зона. Результати досліджень дозволили визначити діапазон значень систем числення АЦП, що знаходиться в межах від 1,8 до 1,95, для яких похибка калібрування є найменшою.

3. Набув подальшого розвитку метод аналізу характеристики вхід-вихід АЦП із ваговою надлишковістю, який, на відміну від існуючого дозволив визначити зони заборонених кодових комбінацій і розрахувати робоче значення основи системи числення перетворювача.

4. Отримала подальшого розвитку узагальнена математична модель статичних похибок циклічного АЦП, в якій, на відміну від існуючої, визначено зв'язок між первинними похибками окремих блоків перетворювача та характеристикою вхід-вихід АЦП, що дозволило систематизувати статичні похибки та запропонувати шляхи їх зменшення. Доведено, що модель похибок є універсальною незалежно від структурної реалізації циклічного АЦП. Усі похибки можна розділити по впливу на характеристику вхід-вихід на дві групи: перша з яких впливає на лінійність перетворювача, а друга на коефіцієнт нахилу характеристику вхід-вихід, а також показано, що найкритичнішими є похибки спричинені відхиленням аналогових компонентів схеми від номіналу і похибки зсуву нуля блоків схеми.

5. Подальшого розвитку отримав метод побудови циклічного АЦП із ваговою надлишковістю шляхом введення структурної надлишковості у вигляді калібрувального АЦП у базову структуру, який відрізняється введенням генератора калібрувальних сигналів, що дозволяє підвищити точність перетворення. Запропонований метод повністю усуває адитивну складову похибки перетворення і дозволив зменшити вплив мультиплікативної. З метою мінімізації апаратних витрат та підвищення ефективності методу запропоновано використовувати калібрувальний АЦП малої розрядності, що виконує процедуру багаторазового врівноваження із усередненням результату.

6. Запропоновано структурну схему циклічного АЦП із ваговою надлишковістю, що самокалібрується за аналізом характеристики вхід-вихід, яка складаються із загальновідомих блоків для реалізації циклічного АЦП та оригінальних розроблених блоків, які реалізують запропонований метод самокалібрування та контролюють роботу перетворювача.

7. Розроблено рекомендації щодо проектування вузлів аналогової частини циклічного АЦП із ваговою надлишковістю. Запропоновано схеми двотактних симетричних підсилювачів постійного струму (похибка лінійності яких не перевищує 1%) та ПВЗ (похибка лінійності не перевищує 0,001%), які додатково підвищують точність циклічного АЦП.

8. Розроблено програмне забезпечення для моделювання процесу самокалібрування циклічного АЦП із ваговою надлишковістю за аналізом характеристики вхід-вихід, яке дозволяє отримати відповідність між кількістю точок, що потрапили в центральну зону багатозначного представлення, та значенням робочої системи числення циклічного АЦП. Також програмне забезпечення дозволяє оцінити точність запропонованого методу

калібрування. З метою підвищення швидкодії циклічного АЦП, результати роботи програми записуються у ПЗП перетворювача і використовуються в режимі основного перетворення.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

За темою досліджень опубліковано 19 наукових праць, основними з них є:

1. Бойко О. В. Розробка та дослідження методів цифрового самокалібрування з використанням вагової надлишковості [Електронний ресурс] / С. М. Захарченко, О. В. Бойко // Електронні праці ВНТУ. – 2009. – № 3. – Режим доступу до журн.: http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/VNTU/2009_3/2009-3.htm.
2. Бойко О. В. Високоточний АЦП із перерозподілом заряду із застосуванням вагової надлишковості / С. М. Захарченко, М. Г. Захарченко, О. В. Бойко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2009. – №2. – С. 21-25.
3. Бойко О. В. Циклічний АЦП із ваговою надлишковістю / С. М. Захарченко, О. В. Бойко / Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – № 3. – С. 208–211.
4. Бойко О. В. Метод калібрування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю / С. М. Захарченко, М. Г. Захарченко, О. В. Бойко // Вісник вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 4. – С. 143-149. – ISSN 1997-9266.
5. Бойко О. В. Аналіз статичних похибок циклічного АЦП із ваговою надлишковістю / С. М. Захарченко, О. В. Бойко, Г. С. Захарченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. – №3. – С. 23-30. – ISSN 1999-9941.
6. Бойко О. В. Методи підвищення точності калібрування АЦП послідовного наближення при застосуванні вагової надлишковості / Захарченко С.М., Захарченко М.Г., Бойко О. В. // Друга міжнародна науково-практична конференція «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації», 22–24 квітня 2009 р. : тези доповідей. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – С. 199-200.
7. Бойко О. В. Самокалібрований циклічний АЦП із ваговою надлишковістю / Захарченко С.М., Бойко О. В. // Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія», 19–21 травня 2010 р. : тези доповідей. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – С. 383-384.
8. Бойко О. В. Метод калібрування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю / С.М. Захарченко, О.В. Бойко // Десята міжнародна науково-технічна конференція «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010)», 19–21 жовтня 2010 р., : тези доповідей. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – С. 145.
9. Бойко О. В. Метод реалізації циклічного АЦП із ваговою надлишковістю / С.М. Захарченко, О.В. Бойко // Третя міжнародна науково-практична конференція «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації», 20–22 квітня 2011р. : тези доповідей. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – С. 204-205.
10. Бойко О. В. Аналіз статичних похибок циклічного АЦП із ваговою надлишковістю / С.М. Захарченко, О.В. Бойко // Третя міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія, 29-31 травня 2012 р., : тези доповідей. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – С. 218-219.
11. України на корисну модель № 42948: (51) МПК (2009) H03M 1/22. Спосіб аналого-цифрового перетворення / Азаров О.Д., Захарченко С.М., Бойко О.В.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u200902279; заявл. 16.03.2009 ; опубл. 27.07.09, Бюл. № 14.
12. Патент України на корисну модель № 43254 : (51) МПК (2009) H03M 1/22. Пристрій аналого-цифрового перетворення / Азаров О.Д., Захарченко С.М., Бойко О.В.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u200902282; заявл. 16.03.2009 ; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15.
13. Патент України на корисну модель № 54812: (51) МПК (2009) H03M 1/00. Спосіб аналого-цифрового перетворення / Захарченко С.М., Бойко О.В., Крупельницький

Л.В.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201006154; заявл. 21.05.2010 ; опубл. 25.11.2010, Бюл. № 22.

14. Патент України на корисну модель № 55701: (51) МПК (2011.01) H03G 3/20. Пристрій аналого-цифрового перетворення / Захарченко С.М., Бойко О.В., Крупельницький Л.В.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201006268; заявл. 25.05.2010 ; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 24.

15. Патент України на корисну модель № 69746: (51) МПК (2012.01) H03K 5/22(2006.01) G05B 1/00. Двотактний симетричний підсилювач струму / Азаров О.Д., Захарченко С.М., Богомолів С.В., Бойко О.В., Тарасова О.М.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201112882; заявл. 02.11.2011 ; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9.

16. Патент України на корисну модель № 70362: (51) МПК (2012.01) H03K 5/22(2006.01) G05B 1/00. Двотактний симетричний підсилювач струму / Азаров О.Д., Захарченко С.М., Богомолів С.В., Бойко О.В.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201113218; заявл. 09.11.2011 ; опубл. 11.06.2012, Бюл. № 11.

17. Бойко О. В. Комп'ютерна програма “Моделювання процедури калібрування циклічного АЦП з ваговою надлишковістю, шляхом визначення основи системи числення за аналізом кодувальної характеристики” / С.М. Захарченко, О.В. Бойко // Свідоцтво на реєстрацію авторського права на твір № 44297. – К. : Державна служба інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації: 13.06.2012 р.

АНОТАЦІЯ

Бойко О. В. Методи та засоби підвищення точності циклічних АЦП на основі вагової надлишковості. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2013.

Дисертацію присвячено дослідженню шляхів підвищення точності циклічних АЦП із ваговою надлишковістю. Запропоновано метод самокалібрування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю за аналізом характеристики вхід-вихід АЦП, що дозволяє розрахувати робоче значення основи системи числення перетворювача і підвищити його точність. Запропоновано метод калібрування циклічного АЦП із ваговою надлишковістю шляхом введення структурної надлишковості у вигляді калібрувального АЦП малої роздільної здатності та генератора калібрувальних сигналів у базову структуру, що дозволяє повністю усунути адитивну складову похибки та зменшити вплив мультиплікативної. Приведено структурні схеми реалізації запропонованих методів калібрування циклічних АЦП. Подальшого розвитку отримав аналіз характеристики вхід-вихід АЦП із ваговою надлишковістю, який дозволив визначити зони заборонених кодових комбінацій і розрахувати робоче значення основи системи числення перетворювача. Розширено узагальнену математична модель статичних похибок циклічного АЦП, в якій визначено зв'язок між первинними похибками окремих елементів перетворювача та характеристикою вхід-вихід АЦП, що дозволило систематизувати статичні похибки та запропонувати шляхи їх зменшення.

Ключові слова: циклічний АЦП, вагова надлишковість, структурна надлишковість, самокалібрування, характеристика вхід-вихід АЦП.

АННОТАЦИЯ

Бойко А. В. Методы и средства повышения точности циклических АЦП на основе весовой избыточности. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Винницкий национальный технический университет, Винница – 2013.

Диссертация посвящена исследованию путей повышения точности циклических АЦП с весовой избыточностью.

Проведен анализ существующих методов повышения точности циклических АЦП.

Предложен метод самокалибровки циклических АЦП с весовой избыточностью по анализу характеристики вход-выход АЦП, что позволяет рассчитать рабочее значение основания системы счисления преобразователя и повысить его точность. Показано, что независимо от параметров АЦП, погрешность калибровки не возрастает экспоненциально. Приведена оценка точности нового метода калибровки в зависимости от разрядности циклического АЦП и основания системы счисления, а также определен диапазон основы системы счисления, в котором погрешность преобразования принимает минимальное значение. Разработаны структурные схемы циклического АЦП с весовой избыточностью, самокалибрующегося по анализу характеристики вход-выход и всех составляющих блоков, а также приведены алгоритмы их работы.

Предложен метод калибровки циклического АЦП с весовой избыточностью путем введения структурной избыточности в виде калибровочного АЦП малой разрешающей способности и генератора калибровочных сигналов в базовую структуру, что позволяет полностью устранить аддитивную составляющую погрешности и уменьшить влияние мультипликативной. Приведены структурные схемы разработанного метода калибровки и генератора калибровочных сигналов, а также даются рекомендации по повышению работы метода путем увеличения разрядности АЦП или увеличения количества сигналов от ГКС.

Дальнейшее развитие получил анализ характеристики вход-выход АЦП с весовой избыточностью, который позволил определить зоны запрещенных кодовых комбинаций и рассчитать рабочее значение основания системы счисления преобразователя. Приведены аналитические выражения для расчета значения рабочей системы счисления независимо от номера зоны многозначного представления и показано, что самой информативной является центральная зона, которая позволяет определить систему исчисления с наименьшей погрешностью.

Расширена обобщенная математическая модель статических погрешностей циклического АЦП, в которой определена связь между первичными погрешностями отдельных элементов преобразователя и характеристикой вход-выход АЦП, что позволило систематизировать статические погрешности и предложить пути их уменьшения. Показано, что предложенная модель является универсальной, независимо от структурного способа реализации АЦП. Доведено, что блоки имеют разную степень влияния на общую погрешность АЦП, а также влияют на аддитивную или мультипликативную составляющую.

Даются рекомендации по проектированию аналоговых узлов рассмотренных АЦП, среди которых устройство выборки-хранения и двухтактные симметрические усилители тока для схем умножения и вычитания, которые позволяют повысить точность преобразования. Разработаны и изготовлены макеты двухтактного симметрического усилителя тока и циклического АЦП с весовой избыточностью на базе микроконтроллера ATmega8. Разработано программное обеспечение для моделирования процесса самокалибровки циклических АЦП с весовой избыточностью по анализу характеристики вход-выход АЦП, результаты которой могут быть записаны в память АЦП и использоваться в режиме основного преобразования, а также позволяет определить точность предложенного метода калибровки.

Ключевые слова: циклический АЦП, весовая избыточность, структурная избыточность, самокалибровка, характеристика вход-выход АЦП.

ABSTRACT

Boiko O. V. Methods and tools of the improving cyclic ADC's accuracy based on weight redundancy. – A manuscript.

The thesis for a Ph.D. science degree by specialty 05.13.05 – Computer System and Components. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2013.

The thesis deals with ways to improve the accuracy of the cyclic ADC with weight redundancy. The method of self-calibration of the cyclic ADC with weight redundancy by analysis of the ADC's input-output characteristic has been proposed in order to calculate the operating value of the converter radix and increase its accuracy. The calibration method of cyclic ADC with weight redundancy is proposed, which consists of introducing structural redundancy in the form of the calibration low-resolution ADC and calibration signal generator in the basic structure, which allows to eliminate additive component of the error and reduce the influence of multiplicative. The structural schemes of the proposed methods of calibration cyclic ADC are added. The analysis of the ADC's input-output characteristic with weight redundancy is elaborated, which allowed to define prohibited zones of the code combinations, in order to calculate the operating value of the converter radix. The generalized mathematical model of static errors of the cyclic ADC has been extended to identify the relationship between the primary errors of individual blocks of the converter and the ADC's input-output characteristic, it allows to arrange the static errors and suggest ways to reduce them.

Keywords: cyclic ADC, weight redundancy, structural redundancy, self-calibration, the input-output ADC characteristic.

Підписано до друку 11.01.2013 р. Формат 29.7×42 ¼
Наклад 100 прим. Зам. № 2013-006
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59