

**ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Кадук Олександр Володимирович**

УДК 681.335

**ВІДМОВОСТІЙКІ БАГАТОРОЗРЯДНІ АЦП І ЦАП,  
ЩО САМОКАЛІБРУЮТЬСЯ, З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ**

Спеціальність 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2010

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**АЗАРОВ Олексій Дмитрович,**  
Вінницький національний технічний університет,  
директор Інституту інформаційних технологій та  
комп'ютерної інженерії, завідувач кафедри обчислювальної  
техніки.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**ВОЛОДАРСЬКИЙ Євген Тимофійович,**  
Національний технічний університет України «Київський  
політехнічний інститут», професор кафедри автоматизації  
експериментальних досліджень;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**БАГАЦЬКИЙ Валентин Олексійович,**  
Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України,  
провідний науковий співробітник відділу перетворювачів  
форми інформації.

Захист відбудеться «26» \_\_\_\_\_ 02 \_\_\_\_\_ 2010 р. о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за  
адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГУК, ауд. 210.

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

Автореферат розіслано «22» \_\_\_\_\_ 01 \_\_\_\_\_ 2010 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

С. М. Захарченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Застосування багаторозрядних ЦАП і АЦП послідовного наближення як пристроїв зв'язку комп'ютерів з об'єктами, зокрема, в інформаційно-вимірвальних системах, багатоканальних системах збору даних, системах управління та інших вимагає відповідності їх метрологічних характеристик заданим нормам протягом всього циклу експлуатації, а також при роботі у складних умовах. Слід відзначити, що за таких вимог під час функціонування у вказаних пристроях можуть виникати три види відмов: катастрофічні, збої і часткові параметричні. Катастрофічні відмови і збої порушують роботу схеми перетворювача через вихід з ладу аналогових вузлів і не є характерними для багаторозрядних ПФІ. Разом з тим, у процесі експлуатації через старіння і під впливом чинників навколишнього середовища характеристики елементів будуть змінюватися, що викликає появу додаткових похибок і відповідно появу часткових параметричних відмов. При цьому властивість багаторозрядних АЦП і ЦАП утримувати похибку перетворення у заданих межах, незважаючи на змінення протягом циклу експлуатації параметрів аналогових вузлів під дією чинників, що впливають, будемо називати відмовостійкістю ПФІ. Багато розробників ПФІ для зменшення похибки перетворення протягом циклу експлуатації пропонують використовувати різні методи самокоригування і самокалібрування, що до того ж сприяє підтриманню відмовостійкості. Водночас, незважаючи на десятиліття наукових досліджень у галузі ПФІ, питання відновлення часткових параметричних відмов у багаторозрядних ЦАП і АЦП розглянуто недостатньо.

Для побудови багаторозрядних ПФІ, як правило, використовують двійкові системи числення. Проте, такі перетворювачі, зокрема, АЦП порозрядного врівноваження мають при цьому ряд недоліків. Так, у двійкових АЦП, що самокоригуються, зменшується швидкодія перетворення, оскільки в даному випадку під час основного перетворення для кожного розряду розраховується коригувальна поправка і витрачається час на її розрахунок і введення. Тому було запропоновано використовувати для їх побудови системи числення з ваговою надлишковістю (СЧВН), оскільки в даному випадку з'являється можливість підвищувати точність АЦП, побудованого на неточних елементах, шляхом врахування відхилень ваг розрядів, а також підтримувати заданий рівень похибок перетворення під час експлуатації при змінні умов навколишнього середовища, а саме: температури, вологості, тобто забезпечувати відмовостійкість до часткових параметричних відмов. Крім того, у ПФІ з ваговою надлишковістю є можливість у комплексі з підтриманням відмовостійкості підвищувати швидкодію АЦП порозрядного кодування в 5-10 разів за рахунок компенсації динамічних похибок, що виникають під час врівноваження.

Водночас, у процесі визначення ваг розрядів під час самокалібрування має місце накопичення методичної похибки. Тому виникла потреба у розробці нових методів самокалібрування для підтримання відмовостійкості багаторозрядних ПФІ. Слід також відзначити, що і до теперішнього часу не розглядалися питання визначення міжкалібрувального інтервалу для ПФІ із ваговою надлишковістю. Таким чином, наукова задача, пов'язана зі створенням нового класу відмовостійких багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного кодування з ваговою надлишковістю, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася згідно з науковим напрямком кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету у рамках науково-дослідних програм «Розробка теорії швидкісного порозрядного аналого-цифрового перетворення на основі вагової надлишкової» (номер державної реєстрації 0105U002439) та «Теорія побудови пристроїв та елементної бази прискореного високоточного аналого-цифрового перетворення» (номер державної реєстрації 0105U000664).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є забезпечення відмовостійкості багаторозрядних АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю шляхом самокалібрування як ваг розрядів, так і характеристики перетворення в цілому. Це дозволяє підтримувати точність перетворення в межах норми, незважаючи на те, що як основні, так і додаткові похибки

елементної бази, що виникають внаслідок появи часткових параметричних відмов аналогових вузлів, перевищують значення, які визначаються роздільною здатністю пристрою.

Для досягнення поставленої мети розв'язуються такі завдання:

1. Аналіз існуючих методів підтримання відмовостійкості багаторозрядних АЦП і ЦАП протягом періоду експлуатації за умови впливу чинників навколишнього середовища, що призводить до змінення параметрів аналогових вузлів та погіршення точності перетворення багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного кодування.

2. Розроблення математичних моделей статичних похибок каналів АЦ- і ЦА-перетворення в умовах, коли ці похибки можуть призвести до параметричної відмови пристрою в цілому. Наявність таких моделей дозволяє оцінити складові цих похибок, їх значення та вплив на точність перетворення.

3. Розроблення нового методу забезпечення відмовостійкості багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного кодування з ваговою надлишковістю, побудованих на низькоточній елементній базі, шляхом цифрового самокалібрування ваг розрядів, що дозволить зменшити підсумкову похибку перетворення у процесі експлуатації при появі часткових параметричних відмов елементів схем.

4. Оцінювання ефективності запропонованого методу самокалібрування багаторозрядних АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю, якщо критерієм є максимальне зниження похибки перетворення після самокалібрування порівняно з первинними похибками елементної бази.

5. Визначення міжкалібрувального інтервалу, дотримання якого дозволить підтримувати точність перетворення, а відповідно і відмовостійкість багаторозрядних АЦП і ЦАП, незважаючи на змінення чинників навколишнього середовища, а також протягом тривалих термінів експлуатації.

6. Розроблення рекомендацій щодо побудови відмовостійких багаторозрядних АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю, що функціонують протягом тривалого терміну експлуатації та при змінні умов навколишнього середовища, а також аналогових вузлів вказаних ПФІ.

7. Розроблення рекомендацій користувачу щодо використання програмного забезпечення для моделювання процедур самокалібрування характеристики перетворення АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю, а також здійснення порівняльного аналізу похибок перетворення до і після виконання самокалібрування.

*Об'єктом дослідження* є процес забезпечення відмовостійкості багаторозрядних ЦАП і АЦП послідовного наближення, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю за умови появи похибок, викликаних впливом часткових параметричних відмов вузлів аналогової частини.

*Предметом дослідження* є методи і засоби забезпечення відмовостійкості багаторозрядних АЦП і ЦАП, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю, побудованих на низькоточній і нестабільній елементній базі.

*Методи дослідження* базуються на використанні: теорії багаторозрядних АЦП і ЦАП з ваговою надлишковістю для аналізу можливості забезпечення відмовостійкості шляхом уведення процедури цифрового самокалібрування; теорії похибок, а також теорії ймовірності та математичної статистики для розроблення моделей статичних похибок перетворення до і після самокалібрування; комп'ютерного моделювання для аналізу процесу АЦ- і ЦА-перетворення з ваговою надлишковістю з використанням процедур самокалібрування ваг розрядів та оцінювання похибок перетворення в процесі експлуатації, а також для перевірки отриманих теоретичних положень.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в тому, що:

- вперше запропоновано метод підтримання відмовостійкості багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного кодування з ваговою надлишковістю, побудованих на неточних і нестабільних аналогових вузлах, що базується на використанні цифрового самокалібрування як ваг розрядів, так і характеристики перетворення в цілому, зокрема, із застосуванням процедури осереднення на розгортках;

- вперше отримано аналітичні вирази для оцінювання міжкалібрувального інтервалу багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного кодування, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю. Наявність таких оцінок дозволить забезпечити відмовостійкість роботи вказаних пристроїв протягом циклу експлуатації при зміні умов навколишнього середовища і старінні елементної бази;

- подальшого розвитку отримали моделі статичних похибок каналів АЦ- і ЦА-перетворення до і після самокалібрування, що дозволило визначити складові похибок вказаних каналів і вичленити кориговані, частково кориговані і некориговані похибки. Доведено також, що характеристика квантування ПФІ на основі СЧВН із природним базисом є нерівномірною, а крок квантування є багатозначним;

- подальшого розвитку отримали аналітичні вирази для порівняння ефективності відомого і запропонованого методів самокалібрування за критерієм максимального зменшення похибки перетворення порівняно з

інструментальними похибками елементної бази. Це дозволяє вибирати необхідний метод самокалібрування залежно від потрібних точносних характеристик багаторозрядних АЦП і ЦАП.

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:

- запропонувати структурні схеми відмовостійких багаторозрядних АЦП і ЦАП, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю, і які можуть функціонувати в умовах змінення температури навколишнього середовища і протягом тривалого терміну експлуатації, а точність перетворення при цьому не погіршується;

- визначити міжкалібрувальний інтервал, якого треба дотримуватися в процесі експлуатації запропонованих ПФІ з ваговою надлишковістю для забезпечення відмовостійкості за умови дії впливових чинників, зокрема змінення температури навколишнього середовища;

- розробити і виготовити апаратуру контролю якості звукових каналів на основі багаторозрядних АЦП і ЦАП, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю, зокрема, аналізатор параметрів звукових трактів АПЗТ-02, що дозволяє покращити якість трансляції програм;

- розробити рекомендації щодо використання програмного забезпечення для моделювання процедур самокалібрування характеристики перетворення багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного кодування з ваговою надлишковістю.

Основні положення, рекомендації та висновки впроваджено в ДП «Укркосмос», м Київ, СП «Інституті електроніки і зв'язку Української академії наук національного прогресу», м. Київ, навчальному процесі на кафедрі обчислювальної техніки у Вінницькому національному технічному університеті.

**Особистий внесок здобувача** в роботах, виконаних у співавторстві: встановлено, що характеристика квантування ПФІ з ваговою надлишковістю є нерівномірною, а крок квантування – змінним, визначено залежність між основою СЧВН і кількістю можливих кроків квантування [1]; досліджено характеристики перетворення АЦП порозрядного кодування і ЦАП з ваговою надлишковістю [2]; розроблено новий метод підтримання відмовостійкості АЦП із ваговою надлишковістю, оцінено ефективність використання даного методу для зменшення похибок АЦП [3, 8]; проведено аналіз існуючих методів підтримання відмовостійкості багаторозрядних ПФІ, запропоновано структурну схему відмовостійкого АЦП із ваговою надлишковістю [4]; удосконалено модель статичних похибок перетворення, визначено закон накопичення методичної похибки самокалібрування, введено поняття нелінійної складової методичної похибки самокалібрування [5]; доведено, що періодичне виконання самокалібрування багаторозрядних АЦП із ваговою надлишковістю дозволяє підтримувати відмовостійкість вказаних пристроїв у процесі експлуатації [6]; запропоновано математичні співвідношення для визначення міжкалібрувального інтервалу, з яким треба виконувати самокалібрування ПФІ для підтримання їх відмовостійкості в процесі експлуатації [7]; запропоновано моделі статичних похибок каналів АЦ- і ЦА-перетворення до і після самокалібрування, виконано поділ похибок вказаних каналів на кориговані, частково кориговані і некориговані [9]; удосконалено блок завдання режимів по постійному струму підсилювальних каскадів, що дозволило покращити характеристики запропонованих аналогових вузлів [9-11]; запропоновано нові структурні схеми АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю, запропоновано структурно-логічні схеми формування результату перетворення АЦП і робочого коду ЦАП [12, 13]; розроблено програмні модулі для моделювання самокалібрування багаторозрядних ПФІ з ваговою надлишковістю й оцінювання ефективності використання вказаних методів [14].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи було апробовано у доповідях на 8 науково-технічних конференціях, а саме: Першій міжнародній науково-практичній конференції «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації», м. Вінниця, ВНТУ, 2007 р.; Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерні системи та мережні технології», м. Київ, НАУ, 2008 р.; IX Міжнародній конференції «Контроль і управління у складних системах (КУСС-2008)», м. Вінниця, ВНТУ, 2008 р.; Другій міжнародній науково-практичній конференції «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації», м. Вінниця, ВНТУ, 2009 р.; IV Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіо-електроніки, телекомунікацій та приладобудування», м. Вінниця, ВНТУ, 2009 р.; та на щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів ВНТУ за участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці у 2007-2009 роках.

**Публікації.** За підсумками наукових досліджень опубліковано 20 наукових праць, включаючи 9 статей у наукових журналах, що входять до переліку періодичних фахових видань, затверджених ВАК України, 6 патентів на корисну модель, 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір, 3 тези доповідей на конференціях.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, що містять 79 рисунків і 14 таблиць, висновків, списку використаних джерел (146 найменувань) і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 175 сторінок, з яких основний зміст викладено на 146 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, зазначено зв'язок з науково-дослідних програмами, 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, публікації та структуру дисертації.

У **першому розділі** здійснено аналіз типів відмов елементів аналогової та цифрової електронної техніки. Визначено, що для багаторозрядних ПФІ характерними є саме поступові відмови. Вони з'являються в процесі експлуатації під впливом чинників навколишнього середовища і через старіння елементів аналогових вузлів, що призводить до появи похибок перетворення ПФІ, зокрема, похибок інтегральної і диференційної лінійності, зміщення нуля та масштабу.

Показано, що використання технологічних і схемотехнічних методів для підтримання відмовостійкості багаторозрядних ПФІ не є достатньо ефективним. Тому провідні виробники багаторозрядних АЦП і ЦАП сьогодні використовують структурно-алгоритмічні методи, а саме: самокоригування та самокалібрування. У підсумку констатується необхідність розробки нового методу самокалібрування і визначення міжкалібрувального інтервалу, дотримання якого дозволить підтримувати відмовостійкість багаторозрядних АЦП і ЦАП протягом всього циклу експлуатації.

У **другому розділі** проведено дослідження арифметико-числових властивостей СЧВН. Подальшого розвитку отримали ряд положень з теорії систем числення з ваговою надлишковістю, зокрема, узагальнено поняття природного та штучного базисів, тобто наборів ваг розрядів, вагової надлишковості. У системах числення з природним базисом існує постійне співвідношення між вагами

$$Q_i = \alpha \cdot Q_{i-1} = \alpha^2 \cdot Q_{i-2} = \alpha^3 \cdot Q_{i-3} = \dots = \alpha^i \cdot Q_0, \quad (1)$$

де  $\alpha = \frac{Q_i}{Q_{i-1}}$  – основа системи числення.

У системах числення зі штучним базисом відношення  $\alpha$  ваг сусідніх розрядів є непостійним. Вага кожного розряду формується у рамках множини  $\{Q_0, Q_1, Q_2, \dots, Q_{n-1}\}$  як певна сума ваг молодших розрядів

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

де  $k$  – деяке ціле число.

Вагова надлишковість характеризується як перевищення суми ваг молодших розрядів над вагою старшого розряду у вигляді:

$$Q_i \leq \sum_{j=0}^{i-1} Q_j. \quad (3)$$

Розроблено моделі похибок каналів АЦ- і ЦА-перетворення, що самокалібруються. Визначено складові похибок перетворення вказаних каналів, що дозволило виконати їх поділ на кориговані, частково-кориговані, некориговані (див. табл. 1). Так структурну схему каналу АЦ-перетворення з самокалібруванням показано на рис. 1, а модель складових похибок відповідно на рис. 2. Тут  $D_1, D_2, \dots, D_n$  – давачі,  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$  – підсилювачі, АК – аналоговий комутатор, Б – буфер, ПВЗ – пристрій вибірки-зберігання, СП – схема порівняння, ПВР – пристрій виділення різниці, ПЕ – пороговий елемент,  $\alpha$ -ЦАП – цифроаналоговий перетворювач із ваговою надлишковістю, РПН – реєстр послідовного наближення, ЦОП – цифровий обчислювальний пристрій, БК – блок керування, ГКС – генератор калібрувального сигналу.

Таблиця 1

**Систематизація складових похибок АЦП порозрядного кодування, що самокалібрується**

Кориговані похибки	Некориговані похибки	Частково-кориговані похибки
1. Зміщення нуля: - П $\Delta_{0П}$ ; - АК $\Delta_{0АК}$ - Б $\Delta_{0Б}$ ; - ПВЗ $\Delta_{0ПВЗ}$ ; - СП $\Delta_{0СП}$ ; - $\alpha$ -ЦАП $\Delta_{0ЦАП}$ . 2. Похибка диф. лінійності $\alpha$ -ЦАП $\Delta_{ДНЛ}$ . 3. Похибка масштабу самокалібрування $\Delta_{МСК}$ .	1. Похибки інтегральної лінійності: - П $\Delta_{ЛНП}$ - Б $\Delta_{ЛНБ}$ ; - ПВЗ $\Delta_{ЛНПВЗ}$ ; - АК $\Delta_{ЛНАК}$ 2. Похибка квантування $\alpha$ -ЦАП $\Delta_{КВЦАП}$ . 3. Похибка суперпозиції ваг розрядів $\Delta_{РОЗ}$ . 4. Інтегральна нелінійність самокалібрування $\Delta_{ІНЛСК}$ .	1. Похибка інтегральної лінійності $\alpha$ -ЦАП $\Delta_{ІНЛ}$ . 2. Змінення коефіцієнта підсилення П $\Delta_{П}$ . 3. Диференційна нелінійність самокалібрування $\Delta_{ДНЛСК}$ .



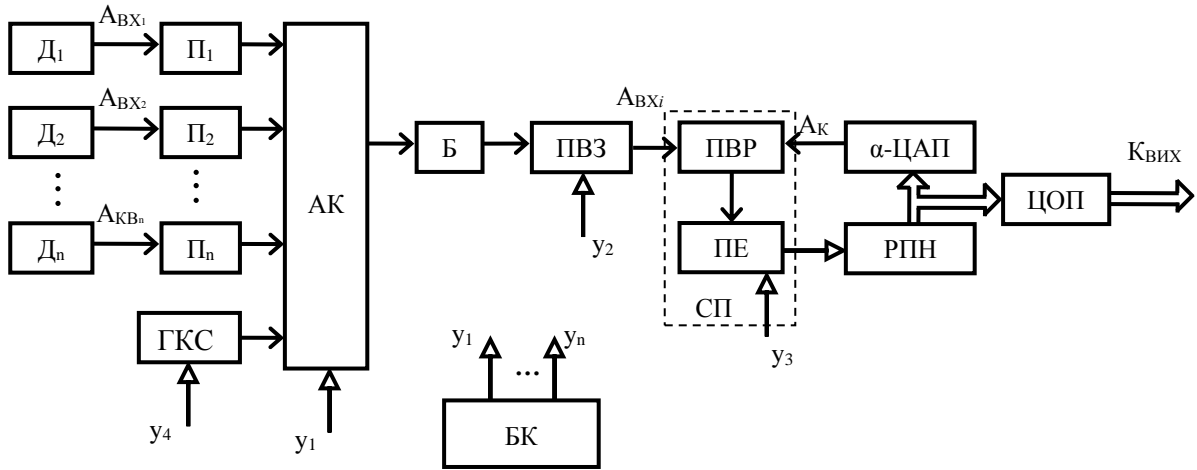


Рис. 1. Структурна схема каналу АЦ-перетворення з самокалібруванням

При цьому цифровий еквівалент  $K_{вих}$  вихідного коду  $N_{вих}$  формується відповідно до такої системи рівнянь:

$$\begin{cases} A_{BXi} = A_{BX} + \Delta_{\Sigma \text{ КАН}}; \\ A_K = K + K \cdot \Delta_{\Sigma \text{ КОМ}}; \\ A_{BXi} - A_K = 0; \\ K_{вих} = K + \Delta_{\Sigma \text{ СП}}, \end{cases} \quad (4)$$

де  $A_{BX}$  – значення аналогової величини на вході перетворювача,  $\Delta_{\Sigma \text{ КАН}}$  – сумарна похибка, що з'являється в результаті появи похибок аналогових вузлів (підсилювача, аналогового комутатора, буфера, пристрою вибірки-зберігання),  $\Delta_{\Sigma \text{ КОМ}}$  – сумарна похибка компенсуючого сигналу на іншому вході СП, що з'являється в результаті появи похибок ваг розрядів ЦАП у процесі експлуатації.

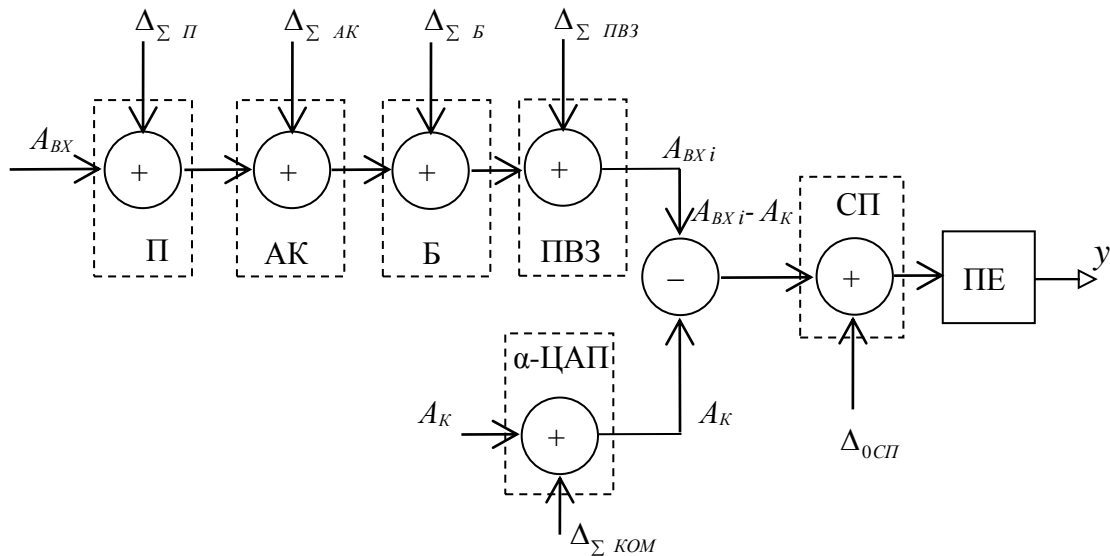


Рис. 2. Складові похибок наскрізного каналу АЦ-перетворення

Виконавши математичні перетворення, отримаємо розв'язок системи рівнянь (4):

$$K_{ВИХ} = \frac{A_{ВХ} + \Delta_{\Sigma КАН}}{1 + \Delta_{\Sigma КОМ}} + \Delta_{0СП} \cdot \quad (5)$$

Абсолютне значення похибки перетворення можна визначити як:

$$\Delta K = \frac{A_{ВХ} + \Delta_{\Sigma КАН}}{1 + \Delta_{\Sigma КОМ}} + \Delta_{0СП} - A_{ВХ} = A_{ВХ} \left( \frac{1}{1 + \Delta_{\Sigma КОМ}} - 1 \right) + \frac{\Delta_{\Sigma КАН}}{1 + \Delta_{\Sigma КОМ}} + \Delta_{0СП} \cdot \quad (6)$$

Також доведено, що характеристика квантування ПФІ на основі СЧВН із природним набором є нерівномірною, а крок квантування – змінним (див. рис. 3). Разом з тим, показано, що набір можливих кроків квантування обмежений і залежить від основи системи числення.

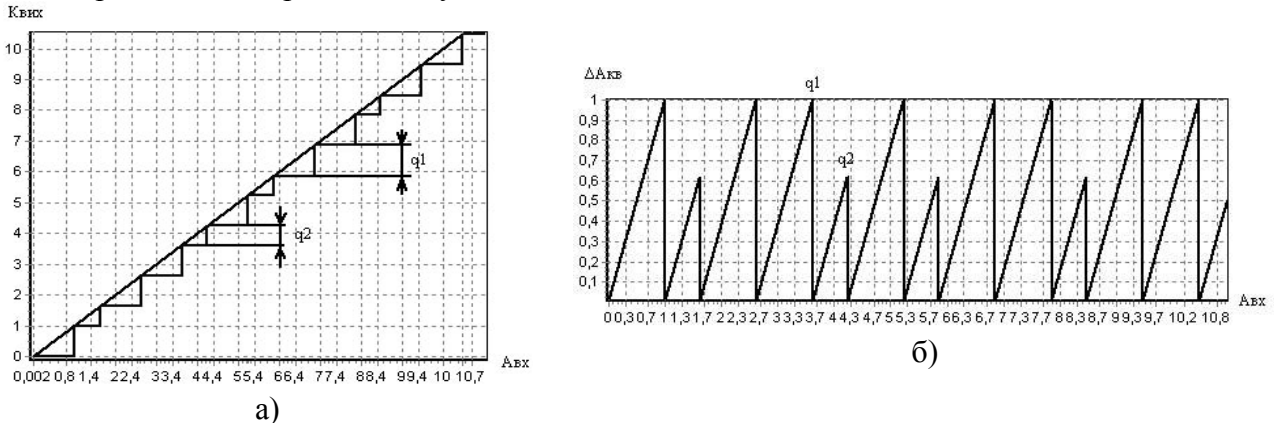


Рис. 3. Можливі кроки квантування ПФІ із ваговою надлишковістю:

- а) характеристика перетворення АЦП з  $\alpha = 1,618$ ;
- б) залежності похибки квантування від вхідного сигналу.

Для усунення лінійної складової вказаної похибки  $\Delta K$  треба застосовувати процедуру цифрового самокалібрування, яка можлива при побудові ПФІ на основі систем числення з ваговою надлишковістю.

Запропоновано новий метод самокалібрування ваг розрядів ЦАП і АЦП з осередненням на розгортках, що дозволяє ефективніше підтримувати відмовостійкість вказаних пристроїв, незважаючи на змінення умов навколишнього середовища в процесі експлуатації. Разом з тим, для побудови ПФІ з ваговою надлишковістю можна використовувати неточну елементу базу, тобто таку, первинні похибки якої значно більші за похибки перетворення ПФІ. Доведено, що використання процедури з осередненням на розгортках дозволяє отримати мінімальне значення методичної похибки самокалібрування і нівелювати вплив часткових параметричних відмов аналогових вузлів ПФІ на вихідні характеристики. Граф-схему алгоритму самокалібрування з осередненням на розгортках показано на рис. 4.

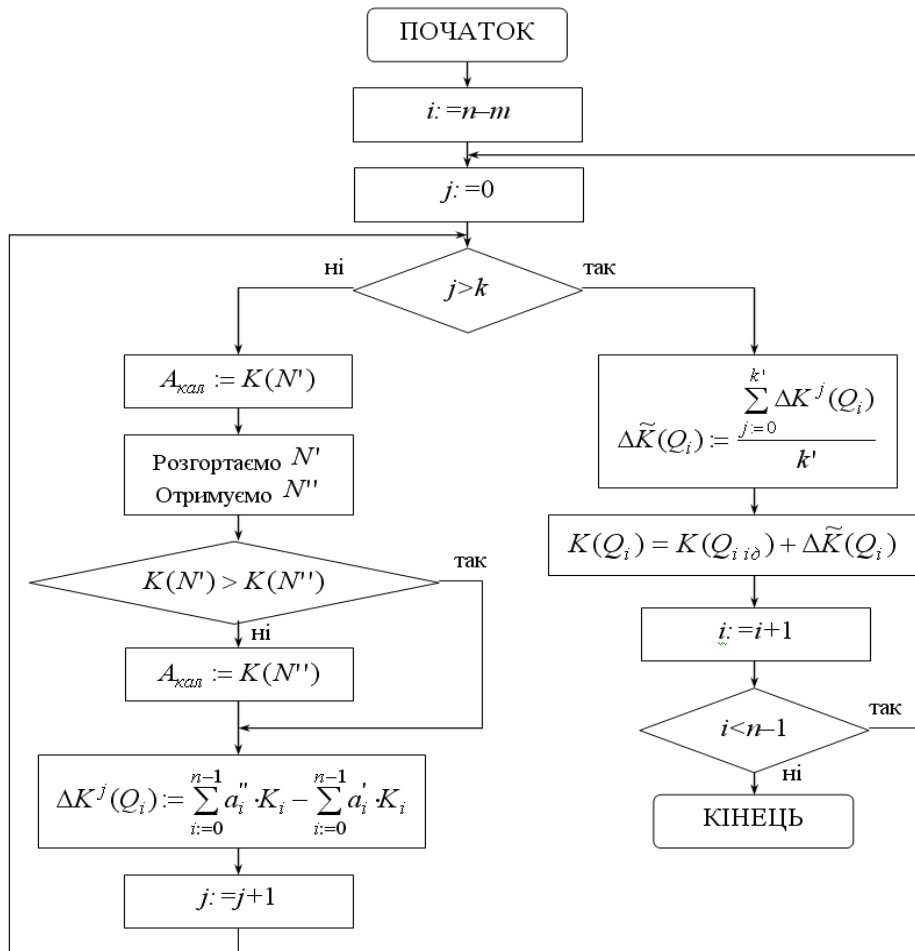


Рис. 4. Граф-схема алгоритму самокалібрування з осередненням на розгортках

У результаті виконання процедури самокалібрування АЦП порозрядного наближення з ваговою надлишковістю відбувається значне зменшення інтегральної та диференційної нелінійності по діапазону перетворення. Інтегральну та диференційну нелінійність АЦП із ваговою надлишковістю можна визначити як:

$$\Delta_{ИЛЛ} = A_{ВХ}(N_i) - Q_0 \cdot K_{ВИХ}(N_i); \quad (7)$$

$$\Delta_{ДНЛ} = A_{ВХ}(N_i) - A_{ВХ}(N_{i-1}), \quad (8)$$

де  $N_i$ ,  $N_{i-1}$  – сусідні робочі коди,  $Q_0$  – вага молодшого розряду

На рис. 6 наведено графік залежності значення похибки інтегральної лінійності від вхідного сигналу до (рис.6.б) і після (рис.6.а) виконання процедури самокалібрування для багаторозрядного АЦП з основою системи числення  $\alpha \approx 1,618$  і технологічним допуском на елементну базу ЦАП 1%.

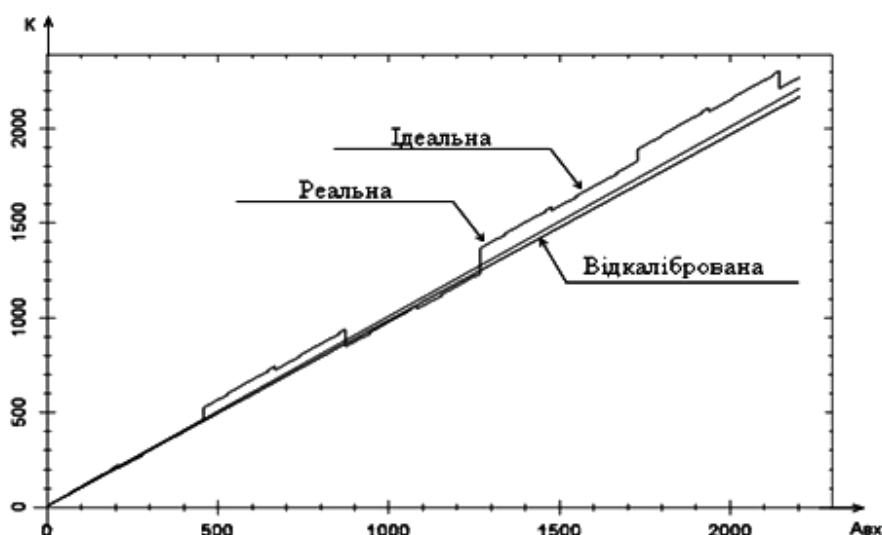


Рис. 5. Характеристика перетворення АЦП із ваговою надлишковістю

На рис. 7а показано графік ефективності проведення самокалібрування багаторозрядних АЦП із ваговою надлишковістю з технологічним допуском на елементну базу 1%, що визначається як відношення похибок лінійності до  $\Delta_{\text{НЛ до СК}}$  і після  $\Delta_{\text{НЛ після СК}}$  проведення калібрування:

$$E = \frac{\Delta_{\text{НЛ до СК}}}{\Delta_{\text{НЛ після СК}}}. \quad (9)$$

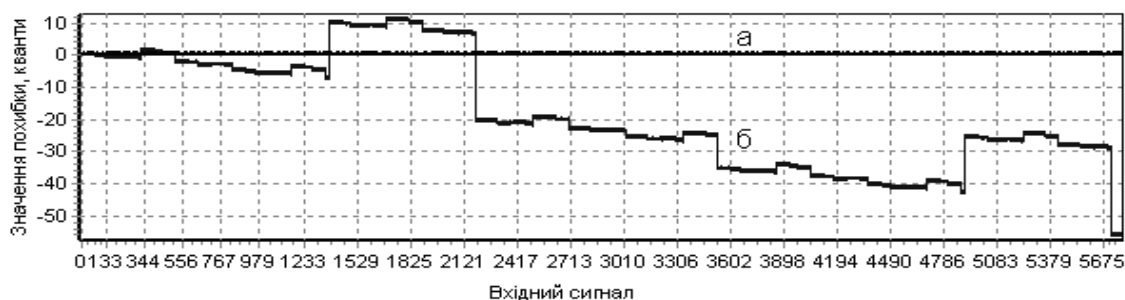


Рис. 6. Розподіл похибок  $\Delta_{\text{НЛ}}$  АЦП по діапазону:

- а) після проведення самокалібрування;
- б) до виконання процедури самокалібрування.

Разом з тим, ефективність використання самокалібрування для зменшення похибок лінійності ПФІ на основі СЧВН визначається з допомогою таких співвідношень:

$$\Delta \bar{Q}_{\text{НЛ } i} = Q_i - (Q_{i-1} - Q_{i-p-1}); \quad (10)$$

$$\delta \bar{Q}_{\text{НЛ}} = \frac{\Delta \bar{Q}_{\text{НЛ } i}}{Q_i}, \quad (11)$$

де  $\Delta \bar{Q}_{\text{НЛ } i}$ ,  $\delta \bar{Q}_{\text{НЛ } i}$  – відповідно абсолютне і відносне значення нелінійної складової методичної похибки самокалібрування,  $Q_i = Q_{i \text{ ід}} + K(\Delta Q_i)$  – відкалібрована вага розряду, що дорівнює сумі ідеальної ваги розряду і поправки до неї. На рис. 7б наведено графік розподілу нелінійної складової для 16-го розряду АЦП на основі СЧВН з  $\alpha = 1,618$  до і після самокалібрування.

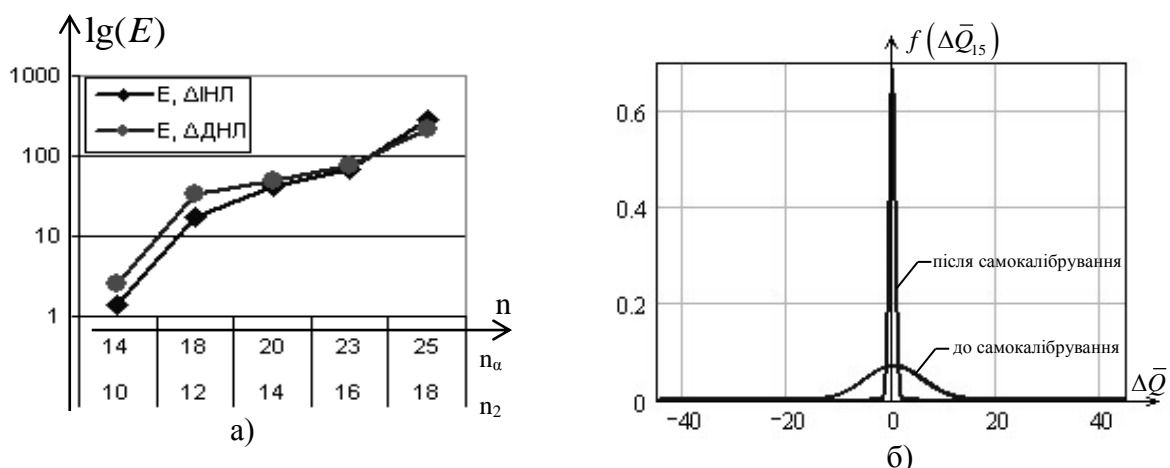


Рис. 7. Ефективність проведення процедури самокалібрування:  
 а) зменшення похибок лінійності;  
 б) розподіл нелінійної складової до і після самокалібрування.

У **третьому розділі** розглянуто запропоновані структури багаторозрядних ЦАП і АЦП, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю (див. рис. 8) та алгоритми їх функціонування. Дані ПФІ здатні підтримувати похибки перетворення в межах норми в процесі експлуатації при змінненні чинників навколишнього середовища. Тут БК – блок керування, АК – аналоговий комутатор,  $\alpha$ -ЦАП<sub>ос</sub> і  $\alpha$ -ЦАП<sub>д</sub> – основний і додатковий цифроаналогові перетворювачі, СП – схема порівняння, ЦОП – цифровий обчислювальний пристрій, РПН1 і РПН2 – перший і другий реєстри послідовного наближення, БРК – блок розгортки коду, РГ – реєстр, БКПНС – блок контролю параметрів навколишнього середовища, ЦК – цифровий комутатор, Рг – реєстр.

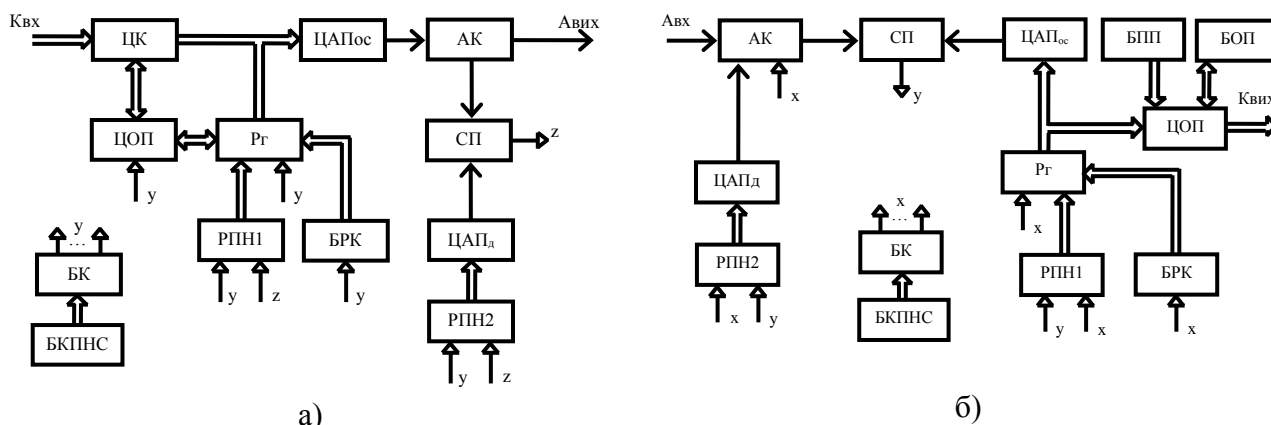


Рис. 8. Структурні схеми ПФІ, що самокалібрується, з ваговою надлишковістю:  
 а) ЦАП паралельної дії;  
 б) АЦП порозрядного кодування.

Отримано структурно-логічну схему формування результату перетворення АЦП. Вихідний двійковий код  $K_{ВИХ}$ , що відповідає вхідному аналоговому сигналу знаходиться на основі надлишкового робочого коду  $N_{РОБ}$ :

$$K_{ВИХ} = \sum_{i=0}^{n_a-1} a_i K(Q_i), \quad (12)$$

де  $K(Q_i)$  – двійковий код ваги розряду  $Q_i$   $\alpha$ -ЦАП, що зберігається в БОП,  $a_i \in (0, 1)$  – розряди надлишкового робочого коду  $N_{РОБ}$ , що відповідає вхідній аналоговій величині:

$$A_{BX} = \sum_{i=0}^{n_\alpha-1} a_i Q_i. \quad (13)$$

У процесі основного перетворення  $\alpha$ -ЦАП спочатку проводиться перетворення вхідного двійкового коду  $K_{BX}$  у робочий  $N_{POB}$  код, тобто  $K_{BX} \rightarrow N_{POB}$ . Робочий код  $N_{POB}$  формується з допомогою ЦОП і через регістр Рг подається на основний  $\alpha$ -ЦАП. Перетворення  $K_{BX}$  у  $N_{POB}$  здійснюється послідовно за  $n_\alpha$  тактів, при цьому  $n_\alpha$  відповідає розрядності надлишкового  $\alpha$ -ЦАП. Вхідний двійковий код  $K_{BX}$  подається на регістр Рг, на виході Рг формується цифровий еквівалент вхідного двійкового коду  $K(K_{BX})$ :

$$K(K_{BX}) = \sum_{i=0}^{n_2-1} a_{i_2} Q_{i_2}, \quad (14)$$

де  $a_{i_2} \in \{0,1\}$  – розрядні коефіцієнти вхідного двійкового коду  $K_{BX}$ ,  $Q_{i_2} = 2^i$  – вага  $i$ -го двійкового розряду,  $n_2$  – розрядність вхідного коду  $K_{BX}$ . Показано, що запропонований підхід дозволяє здійснювати обчислення в традиційній двійковій системі числення і не вимагає додаткових перетворювачів кодів.

Отримано аналітичні вирази для оцінювання міжкалібрувального інтервалу багаторозрядних АЦП і ЦАП порозрядного кодування з ваговою надлишковістю. Характеристика, що визначає потребу переведення ПФІ із основного режиму перетворення у режим самокалібрування, називається міжкалібрувальним інтервалом  $t_{MK}$ , що визначає час роботи схеми в режимі основного перетворення. Періодичність і порядок виконання самокалібрування залежить від призначення системи, до складу якої входить багаторозрядний ПФІ. Якщо вимірювання короткотривале і періодичне, то самокалібрування необхідно проводити відразу після вмикання ПФІ. Далі проводиться кілька тестових перетворень з метою «розігріву» системи, що може призвести до змінення параметрів аналогових вузлів. Після цього по команді БК ПФІ знову перемикається в режим самокалібрування, у результаті чого у блоці оперативної пам'яті зберігаються коди реальних ваг розрядів  $K(Q_i)$  основного  $\alpha$ -ЦАП.

Коли АЦП або ЦАП використовуються в системах, де здійснюється довготермінове накопичення інформації, то підхід дещо відрізняється. Як і в попередньому випадку ПФІ після вмикання самокалібрується, потім «прогрівається» і знову калібрується. Далі ПФІ перебуває у режимі основного перетворення. При змінні температури навколишнього середовища на  $\Delta T$  градусів (див. вираз 15), що фіксується давачем температури, може з'явитися параметрична відмова одного з розрядів  $Q_i$   $\alpha$ -ЦАП. Для нівелювання впливу відхилення ваги розряду  $Q_i$  від реального значення на вихідні характеристики ПФІ необхідно по команді БК перевести пристрій з режиму основного перетворення у режим самокалібрування.

$$T = \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} T_i^2} = \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} \left( \frac{Q_{i \text{ id}} - \Delta Q_i}{Q_{i \text{ id}} \alpha_T} \right)^2}. \quad (15)$$

Виконуючи самокалібрування з інтервалом  $t_{MK}$  (див. вираз 16), що визначається за допомогою внутрішнього таймера ПФІ, можна нівелювати параметричні відмови аналогової частини ПФІ, що з'являються через старіння елементів схеми, і уникнути появи похибок перетворення, тобто виникнення параметричної відмови пристрою в цілому.

$$t_{MK} = \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} t_i^2} = \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} \left( \frac{Q_{i \text{ id}} - \Delta Q_i}{Q_{i \text{ id}} \beta_i} \right)^2}. \quad (16)$$

Обчислення по виразах (15, 16) можна виконувати на ПЕОМ і з його допомогою переводити ПФІ в режим самокалібрування. Разом з тим, для того щоб забезпечити процес перетворення без переривання на самокалібрування, необхідно використовувати двоканальну систему. Відповідну структурну схему представлено на рис. 9. Тут АК – аналоговий комутатор, СхСк – схема самокалібрування.

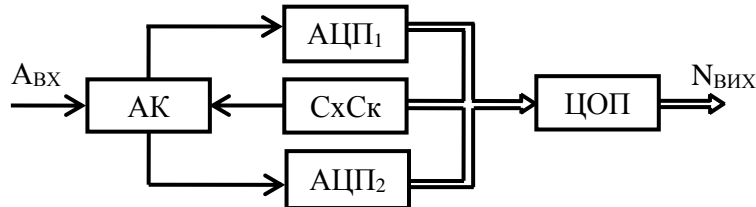


Рис. 9. Структурна схема двоканального АЦП, що самокалібрується

У **четвертому розділі** сформульовано рекомендації для проектування відмовостійких багаторозрядних ПФІ з ваговою надлишковістю. Суть основних з них є такою:

- уведення до структури ПФІ, що самокалібрується, з ваговою надлишковістю блоку для контролю змінення параметрів навколишнього середовища і генерування відповідних цифрових сигналів до БК ПФІ;
- побудова ГКС на базі ЦАП із ваговою надлишковістю або інтегратор на базі операційного підсилювача, що дозволяє отримати нерозривну характеристику перетворення;
- увести до структури АЦП такі цифрові блоки: ЦОП, БОП, БПП для перетворення робочого коду на виході основного РПН у вихідний двійковий код цифрового еквіваленту, що відповідає вхідному аналоговому сигналу;
- використання в ЦАП таких блоків: ЦОП, БПП, БОП для перетворення вхідного двійкового коду в робочий код цифрового еквіваленту вихідного аналогового сигналу;
- використання в ЦАП схеми порівняння, що застосовується в режимі самокалібрування.

Розроблено структурні і принципові схеми аналогових вузлів ПФІ, зокрема: двотактного симетричного підсилювача постійного струму, буферного каскаду, вхідного пристрою схеми порівняння струмів, підсилювача постійного струму із комутацією вихідних сигналів. Використання запропонованих високолінійних і швидкодіючих схем аналогових вузлів АЦП і ЦАП дозволить додатково покращити характеристики перетворення. Запропоновано рекомендації щодо використання багаторозрядних відмовостійких ПФІ в аналізаторі параметрів звукових трактів, що гарантує точність роботи пристрою у процесі експлуатації. Розроблено програмне забезпечення для моделювання процедур самокалібрування характеристики перетворення багаторозрядних надлишкових АЦП і ЦАП, що дозволяє визначити оптимальні характеристики для різних параметрів розроблених схем ПФІ і вибрати оптимальні.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблено елементи теорії відмовостійких багаторозрядних АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю. Це є підґрунтям для побудови класу багаторозрядних високолінійних АЦП порозрядного кодування і ЦАП паралельної дії з ваговою надлишковістю, метрологічні характеристики яких практично не залежать від змінення умов навколишнього середовища. Використання такого класу ПФІ у інформаційно-вимірювальних системах, системах контролю дозволяють забезпечити параметричну відмовостійкість вказаних систем за рахунок періодичного виконання процедури самокалібрування. Основні результати досліджень такі:

1. Здійснено аналіз існуючих методів підтримання відмовостійкості багаторозрядних ЦАП і АЦП. Показано, що актуальним є розробка нових методів підтримання відмовостійкості багаторозрядних ПФІ. Зокрема, перспективним є використання методу цифрового самокалібрування ваг розрядів і характеристики перетворення ПФІ з ваговою надлишковістю.

2. Запропоновано новий метод підтримання відмовостійкості багаторозрядних ЦАП і АЦП із ваговою надлишковістю, побудованих на неточних і нестабільних аналогових вузлах, шляхом цифрового самокалібрування як ваг розрядів, так і характеристики перетворення в цілому, зокрема, з виконанням процедури осереднення на розгортках;

3. Вперше отримано аналітичні вирази для оцінювання міжкалібрувального інтервалу багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного кодування з ваговою надлишковістю, що дозволить підтримувати відмовостійкість роботи вказаних пристроїв протягом всього циклу експлуатації при змінненні параметрів навколишнього середовища і старінні елементів аналогових вузлів;

4. Подальшого розвитку отримали аналітичні вирази для оцінювання ефективності процедур самокалібрування, зокрема, з осередненням на розгортках, що дозволяє оцінити доцільність використання того чи іншого методу самокалібрування залежно від потрібних точносних характеристик багаторозрядних АЦП і ЦАП;

5. Подальшого розвитку отримали моделі статичних похибок каналів АЦ- і ЦА-перетворення до і після самокалібрування, що виникають в результаті появи часткових параметричних відмов. Це дозволило визначити складові похибок вказаних каналів і вичленити кориговані, частково кориговані і некориговані похибки.

6. Доведено, що характеристика квантування ПФІ на основі СЧВН із природним базисом є нерівномірною, а крок квантування – багатозначним. Встановлено, що набір можливих кроків квантування обмежений і залежить від основи системи числення, що дозволить враховувати похибки квантування при оцінюванні загальної похибки перетворення багаторозрядних АЦП і ЦАП;

7. Розроблено рекомендації для проектування відмовостійких багаторозрядних ПФІ з ваговою надлишковістю. Подальшого розвитку отримали структури АЦП порозрядного кодування і ЦАП паралельної дії, а також схеми аналогових вузлів вказаних пристроїв. Розроблено структурно-логічні схеми формування результату перетворення АЦП і цифрового еквіваленту робочого коду ЦАП. Показано, що такий підхід дозволяє здійснювати обчислення в традиційній двійковій системі числення і не вимагає додаткових перетворювачів кодів на виході АЦП (вході ЦАП).

8. Розроблено програмне забезпечення для моделювання процедур самокалібрування характеристики перетворення багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного кодування з ваговою надлишковістю, що дозволяє оцінювати характеристики багаторозрядних ПФІ з ваговою надлишковістю, оптимізувати алгоритми їх роботи, змінюючи число розрядів, основу системи числення, допуски на елементу базу та ін.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

За темою досліджень опубліковано 20 наукових праць, основними з них є:

1. Кадук О. В. Похибки квантування в АЦП на основі надлишкових позиційних систем числення / Азаров О.Д., Решетнік О.О., Гарнага В.А., Кадук О.В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 3 (72). – С. 67–73.

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

3. Кадук О.В. Стратегії самокалібрування характеристики перетворення АЦП порозрядного кодування з ваговою надлишковістю / Азаров О.Д., Кадук О.В. // Вісник



Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 1 (76). – С. 102–110.

4. Кадук О. В. Методи побудови АЦП порозрядного наближення, що самокалібруються / Азаров О.Д., Кадук О.В. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2008. – № 1 (15). – С. 56–66.

5. Кадук О.В. Методичні похибки самокалібрування АЦП послідовного наближення із ваговою надлишковістю / Азаров О.Д., Кадук О.В. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – № 5 (117). – С. 12–17.

6. Кадук О. В. Математична модель відмов ЦАП, що самокалібрується, із ваговою надлишковістю / Азаров О.Д., Кадук О.В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 5 (80). – С. 78–83.

7. Кадук О. В. Оцінювання міжкалібрувального інтервалу для багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного перетворення із ваговою надлишковістю / Азаров О.Д., Кадук О.В. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2009. – № 1 (14). – С. 5–12.

8. Кадук О. В. Високочастотні АЦП порозрядного врівноваження із ваговою надлишковістю, що самокалібруються, для комп'ютерних систем оброблення даних / Азаров О.Д., Кадук О.В. // Проблеми інформатизації та управління. – 2007. – Випуск 1 (23). – С. 84–91.

9. Кадук О. В. Кориговані і некориговані похибки багаторозрядних ПФІ, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю / Азаров О. Д., Кадук О. В., Дудник О. В. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – № 2 (18). – С. 99–109.

10. Пат. на корисну модель 22671 Україна, МПК (2006) H03K 5/22, G05B 1/00. Двотактний симетричний підсилювач струму / О.Д. Азаров, О.В. Кадук, О.О. Лукашук, С.В. Богомолів, Л.В. Крупельницький; заявн. Вінницький національний технічний університет. – № u200613036; заявлено 11.12.2006; опубл. 25.04.2007; Бюл. № 5. – 12 с.

11. Пат. на корисну модель 23906 Україна, МПК (2006) H03K 5/22, G05B 1/00. Буферний каскад / О.Д. Азаров, О.В. Кадук, В.В. Ратнюк, Л.В. Крупельницький; заявн. Вінницький національний технічний університет. – № u200701187; заявлено 05.02.2007; опубл. 11.06.2007; Бюл. № 8. – 8 с.

12. Пат. на корисну модель 25471 Україна. МПК (2006) H03K 5/22, G05B 1/00. Вхідний пристрій схеми порівняння струмів / О.Д. Азаров, О.В. Кадук, С.В. Богомолів, В.А. Гарнага, О.О. Решетнік; заявн. Вінницький національний технічний університет. – № u200703563; заявлено 02.04.2007; опубл. 10.08.2007; Бюл. № 12. – 12 с.

13. Пат. на корисну модель 44123 Україна. МПК (2009) H03M 1/00. Аналого-цифровий перетворювач / О.Д. Азаров, О.В. Кадук; заявн. Вінницький національний технічний університет. – № u200901544; заявлено 23.02.2009; опубл. 25.09.2009; Бюл. № 18. – 12 с.

14. Пат. на корисну модель 41315 Україна. МПК (2009) H03M 1/66. Цифро-аналоговий перетворювач / О.Д. Азаров, О.В. Кадук; заявн. Вінницький національний технічний університет. – № u200900491; заявлено 23.01.2009; опубл. 12.05.2009; Бюл. № 9. – 12 с.

15. Кадук О.В. Комп'ютерна програма «Моделювання процедури самокалібрування багаторозрядних АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю» / О. Д. Азаров, О. В. Кадук, О. В. Дудник // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 29467. – К.: Державний департамент інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації: 15.07.2009.

## АНОТАЦІЯ

Кадук О. В. Відмовостійкі багаторозрядні АЦП і ЦАП, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця – 2010.

Дисертацію присвячено розробці методів забезпечення відмовостійкості багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного кодування з ваговою надлишковістю. Запропоновано метод підтримання відмовостійкості багаторозрядних ПФІ з ваговою надлишковістю шляхом цифрового самокалібрування ваг розряді і характеристики перетворення з виконанням багаторазових розгортки та подальшим осередненням отриманих результатів. Запропоновано аналітичні вирази для оцінювання міжкалібрувального інтервалу, що дозволить підтримувати відмовостійкість роботи вказаних пристроїв протягом всього циклу експлуатації. Отримано співвідношення для оцінювання ефективності процедур самокалібрування, що дозволяє визначити доцільність використання тієї чи іншої процедури при проектуванні багаторозрядних ПФІ. Доведено, що характеристика квантування ПФІ на основі систем числення з ваговою надлишковістю (СЧВН) із природним базисом є нерівномірною, а крок квантування багатозначний. Встановлено, що набір можливих кроків квантування обмежений і залежить від основи системи числення, що дозволить враховувати похибки квантування при оцінюванні загальної похибки ПФІ.

Ключові слова: відмовостійкість, аналого-цифровий перетворювач, цифроаналоговий перетворювач, вагова надлишковістю, самокалібрування.

## АННОТАЦИЯ

Кадук А. В. Отказоустойчивые многоразрядные самокалибрующиеся АЦП и ЦАП с весовой избыточностью. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Винницкий национальный технический университет, Винница – 2010.

Диссертация посвящена разработке методов обеспечения отказоустойчивости многоразрядных ЦАП и АЦП поразрядного кодирования с весовой избыточностью. Предложен метод поддержания отказоустойчивости многоразрядных ПФИ с весовой избыточностью путем цифровой самокалибровки весов разрядов и характеристики преобразования с выполнением многоразовых разверток и дальнейшим усреднением полученных результатов. Предложены аналитические выражения для оценки межкалибровочного интервала, которые позволят поддерживать отказоустойчивость указанных устройств на протяжении всего цикла эксплуатации. Получены аналитические выражения для оценки эффективности процедур самокалибровки, которые разрешают определить целесообразность использования той или иной процедуры при проектировании многоразрядных ПФИ. Доказано, что характеристика квантования ПФИ на основании систем счисления с весовой избыточностью с естественным базисом есть неравномерной, а шаг квантования многозначительный. Установлено, что набор возможных шагов квантования ограничен и зависит от основы системы счисления, что разрешит учитывать погрешности квантования при определении общей погрешности ПФИ.

Ключевые слова: отказоустойчивость, аналого-цифровой преобразователь, цифроаналоговый преобразователь, весовая избыточность, самокалибровка.

## ABSTRACT

Kaduk O. V. Fault tolerance multi-bit self-calibrating ADC and DAC with weight surplus. – A manuscript.

The thesis for a Ph.D. science degree by specialty 05.13.05 – Computer System and Components. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia – 2010.

The important scientific problem is solved in the thesis. The elements of fault tolerance multi-bit ADC and DAC with weight surplus theory are developed. This is a subsoil for the construction the new class of multi-bit high-linear successive approximation ADC and DAC with weight surplus which metrology characteristics practically do not depend on the variation of environment conditions. Use of such class of information form converters in information-measuring systems, control systems allows to guarantee fault tolerance of all system.

The existing methods analysis of multi-bit ADC and DAC fault tolerance maintenance is carried out. It is defined that constructing new methods of fault tolerance maintenance of multi-bit information form converters is actual. In particular, the use of digital self-calibration method of bits weight and transfer characteristic of information form converters is perspective. Digital self-calibration is possible when multi-bit ADC and DAC are built on scale of notation with weight surplus. Multi-bit ADC and DAC construction on scale of notation with weight surplus also allows to speed-up conversion due to dynamic errors indemnification.

Self-calibration is the variety of self-correction which used for information form converters built on traditional binary notation. In the process of the self-calibration procedure the digital equivalents codes of inaccurate bits deviations are determined by comparing the weight of current calibrated bit with the definite group of less bits with the follow-up calculation of the corrected values of «inexact» bits. The comparison is performed on the base of existing mathematical correlations between DAC bits. In this case the use of the special exemplary measures or standard signals devices aren't needed. Unlike self-correction in the mode of basic conversion the corrective is entered in a digital form which does not influence on the information conversion performance.

The method of fault tolerance maintenance of multi-bit DAC and successive approximation ADC with weight surplus, built on inexact and unstable analog units, is proposed. This method uses digital self-calibration of bit weights and transfer characteristic, in particular, with implementation of averaging on evolvent procedure. Within the framework of this procedure the multiple evolvent of calibrating bits is executed. Further the got results are averaged.

Analytical equations for calibration interval evaluation of multi-bit DAC and successive approximation ADC with weight surplus were received. These equations allow to maintain conversion fault tolerance during all cycle of exploitation at the environment parameters change and analog units elements senescence.

Analytical equations for self-calibration procedures efficiency evaluation were received, in particular, one-cyclic with setting individual level of calibration signal and averaging on evolvent procedure. It allowed to estimate efficacy of different self-calibration methods depending on necessary multi-bit ADC and DAC precision descriptions. A concept of nonlinear constituent of self-calibration methodical error was put forward. The concept determines efficiency of linear errors diminishing after self-calibration.

The static errors models of AD- and DA-conversion channels before and after self-calibration are proposed. These errors are appeared because of particular parametric failure as a result of environment factors and elements senescence of multi-bit ADC and DAC analog units. It allowed to define the errors constituent of these channels and to pick out corrected, partly corrected and uncorrected errors.

It is proved that a quantization characteristic of information form converters built on scale of notation with weight surplus with natural base is irregular and step of quantum is significant. It is determined that the set of possible quantum steps is limited one and depends on scale of notation base which will allow to take into account the quantum errors at the evaluation of general conversion error of multi-bit ADC and DAC with weight surplus.

The structures of fault tolerance multi-bit successive approximation ADC and DAC and structures of analog units of indicated devices are proposed. It is developed structurally logical charts of forming the conversion result of ADC and digital equivalent of DAC working code. It is shown that such approach allows to carry out a calculation in the traditional binary scale of notation and does not require the additional code converter on the ADC output (DAC input).

Recommendations for planning of fault tolerance multi-bit information form converters with weight surplus are developed.

Software for simulation of conversion process of multi-bit self-calibrating DAC and successive approximation ADC with weight surplus is developed. It allows to estimate characteristic of multi-bit information form converters with weight surplus, to optimize the algorithms of their work changing the number of bits, base of scale of notation, tolerance on the elements etc.

Keywords: fault tolerance, analog-to-digital converter, digital-to-analog converter, weight surplus, self-calibration.

Підписано до друку 19.01.2010 р. Формат 29.7×42 ¼  
Наклад 100 прим. Зам. № 2010-010  
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету.  
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59