

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

О. Д. Азаров, О. В. Кадук

**БАГАТОРОЗРЯДНІ АЦП І ЦАП
ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ,
СТІЙКІ ДО ПАРАМЕТРИЧНИХ ВІДМОВ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2010

УДК 004.387:621.3.087.92

ББК 32.973.3

А 35

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 8 від 25.03.2010 р.)

Рецензенти:

Є. Т. Володарський, доктор технічних наук, професор

Р. Н. Квстний, доктор технічних наук, професор

Азаров, О. Д.

А 35 Багаторозрядні АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю, стійкі до параметричних відмов : монографія / О. Д. Азаров, О. В. Кадук. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 150 с.

ISBN 978-966-641-369-0

У монографії розглянуто питання побудови багаторозрядних ЦАП паралельної структури і АЦП порозрядного кодування з ваговою надлишковістю. Запропоновано методи підтримання відмовостійкості вказаних пристроїв в процесі експлуатації при появі параметричних відмов аналогових вузлів перетворювачів інформації. Запропоновано аналітичні вирази для оцінювання міжкалібрувального інтервалу, дотримання якого дозволить підтримувати точність перетворення АЦП і ЦАП протягом циклу експлуатації на заданому рівні. Книга розрахована на науковців, аспірантів та інженерів, які займаються розробкою високоточних аналого-цифрових перетворювачів.

УДК 004.387:621.3.087.92

ББК 32.973.3

ISBN 978-966-641-369-0

© О. Азаров, О. Кадук, 2010

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТИПІВ ВІДМОВ І МЕТОДІВ ПІДТРИМАННЯ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ БАГАТОРОЗРЯДНИХ АЦП І ЦАП	12
1.1. Аналіз типів відмов елементів аналогової і цифрової електронної техніки	12
1.2. Вплив часткових параметричних відмов елементів аналогових вузлів на похибки перетворювачів форми інформації (ПФІ)	18
1.3. Аналіз існуючих методів підтримання відмовостійкості багаторозрядних ПФІ	23
РОЗДІЛ 2 МЕТОД ПІДТРИМАННЯ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ БАГАТОРОЗРЯДНИХ АЦП І ЦАП ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ ШЛЯХОМ САМОКАЛІБРУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕТВОРЕННЯ	40
2.1. Арифметико-числові властивості систем числення з ваговою надлишковістю та їх вплив на характеристики перетворення ПФІ	40
2.2. Кориговані і некориговані статичні похибки каналів АЦ і ЦА-перетворення	45
2.3. Вплив статичних похибок каналів перетворення на виникнення часткових параметричних відмов ПФІ	57
2.4. Метод самокалібрування для підтримання відмовостійкості багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного наближення	62
2.4.1. Одноциклове самокалібрування ваг розрядів із заданням індивідуального рівня калібрувального сигналу	63
2.4.2. Самокалібрування з усередненням на розгортках	65
2.5. Ефективність методів самокалібрування для підтримання відмовостійкості ПФІ	70
РОЗДІЛ 3 СТРУКТУРНА ОРГАНІЗАЦІЯ ВІДМОВОСТІЙКИХ БАГАТОРОЗРЯДНИХ АЦП І ЦАП, ЩО САМОКАЛІБРУЮТЬСЯ, З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ	77
3.1. Структури і алгоритми функціонування відмовостійких багаторозрядних ПФІ з ваговою надлишковістю	77
3.1.1. ЦАП, що самокалібрується, з ваговою надлишковістю	77

3.1.2. АЦП порозрядного наближення з самокалібруванням характеристики перетворення	87
3.2. Формування результату перетворення АЦП і визначення вхідного робочого коду ЦАП	89
3.3. Оцінювання міжкалібрувального інтервалу і коефіцієнту готовності	94
РОЗДІЛ 4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРОЕКТУВАННЯ ВІДМОВСТІЙКИХ ПФІ, ЩО ФУНКЦІОНУЮТЬ В УМОВАХ ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ЧИННИКІВ НА ПОХИБКИ ПЕРЕТВОРЕННЯ.....	101
4.1. Відмовостійкі ПФІ, що функціонують при змінній тем- ператури навколишнього середовища і протягом тривалого терміну експлуатації.....	101
4.2. Аналогові вузли ПФІ, що самокалібруються, у вигляді ВІС	106
4.2.1. Вхідний, вихідний буфери	106
4.2.2. Вхідний пристрій схеми порівняння струмів	108
4.2.3. Підсилювач постійного струму з комутацією вихідних сигналів	111
4.2.4. Двотактний симетричних підсилювач постійного струму	112
4.3. Рекомендації щодо використання багаторозрядних від- мовостійких АЦП порозрядного кодування в аналізаторі па- раметрів звукових трактів	116
4.4. Рекомендації користувачу щодо використання програм- ного забезпечення для моделювання процедур самокалібру- вання характеристики перетворення АЦП і ЦАП.....	120
ВИСНОВКИ.....	125
ЛІТЕРАТУРА	128
Додаток. Лістинг програми для моделювання процедур самока- лібрування багаторозрядних АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю	142

ВСТУП

Застосування багаторозрядних ЦАП і АЦП послідовного наближення в інформаційно-вимірювальних системах, багатоканальних системах збору даних, апаратурі для контролю статичних і динамічних характеристик систем теле- й радіомовлення, аерокосмічній галузі, системах контролю метрологічних характеристик електронних схем, апаратурі для сейсмозв'язки й отримання сейсмограм, вимірювальних системах метрологічної атестації аналого-цифрових систем, пристроях для високоточного перетворення фізичних величин, акустичних вимірюваннях 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 [1, 2]. При цьому, надійність АЦП і ЦАП розглядається переважно по відношенню до катастрофічних відмов і збоїв [3]. Вони порушують роботу схеми перетворювача через вихід з ладу аналогових вузлів і не є характерними для багаторозрядних ПФІ [4]. Щодо часткових параметричних відмов, то вони не порушують робочого стану ПФІ, однак суттєво впливають на точність його роботи. Часткові відмови проявляються у зміні параметрів аналогових вузлів ЦАП та АЦП і призводять до збільшення похибки перетворення і її виходу за межі допуску. Це відповідно асоціюється з частковою параметричною відмовою пристрою в цілому [3, 5].

Особливо гострою проблема виходу похибки перетворення за зону допуску ϵ у багаторозрядних ПФІ [6–8]. Це проявляється у невідповідності декларованої роздільної здатності реальному значенню похибки перетворення. Наприклад, найкращі сучасні АЦП не дають абсолютної точності перетворення більше 12 двійкових розрядів у широкому діапазоні температур і протягом життєвого циклу, що пов'язано з наявністю фундаментальних обмежень із забезпечення точності і стабільності параметрів аналогових вузлів [6].

Щодо цифрових вузлів або цифрових пристроїв слід відзначити таке. Мікросхемами цифрових пристроїв, наприклад, мікропроцесори,

схеми пам'яті можуть містити сотні тисяч і мільйони елементів. При цьому, незважаючи на задання досить широких зон допусків параметрів елементів (10...20%), ймовірність появи повної відмови висока. Натомість кількість елементів в АЦП і ЦАП значно менша (на порядки). Тому у цьому плані ПФІ можна вважати надійними по відношенню до катастрофічних відмов. Водночас, для цифрових пристроїв нема сенсу говорити про параметричну відмовостійкість, оскільки якщо орієнтуватися на технологічні методи, то первинні похибки їх елементної бази можуть бути значно (на порядки) більшими порівняно з багаторозрядними АЦП і ЦАП. Проте для багаторозрядних ПФІ проблема параметричної відмовостійкості стоїть досить гостро.

Стосовно АЦП, особливо багаторозрядних (12...18), слід виділити групи похибок перетворення, зокрема, такі як: первинні інструментальні похибки і додаткові, що з'являються в процесі експлуатації. Первинні похибки мають місце безпосередньо після виготовлення пристрою і обумовлені неточністю задання параметрів елементної бази та можуть бути значними. Наприклад, відносна похибка виготовлення мікроелектронних резисторів без лазерного припасування складає 1...3%, конденсаторів – 0,1...1% [9, 10]. Це для багаторозрядних ПФІ є неприпустимим, тому для зменшення похибок елементної бази використовуються різні дорогавартісні технологічні прийоми, зокрема, лазерне припасування параметрів аналогових вузлів [10]. Вказана процедура руйнує структуру матеріалів компонентів, що у свою чергу погіршує часову і температурну стабільність [10]. Разом з тим, лазерне припасування дає короткочасний ефект за умови функціонування перетворювачів у широкому діапазоні температур. До того ж слід зазначити, що можливості удосконалення елементної бази аналогових вузлів, як правило, є обмеженими [6]. Так, аналіз моделей багаторозрядних ЦАП і АЦП, що випускаються серійно провідними фірмами світу, зокрема, Analog Devices, Intersil, Maxim Integrated Products, Texas Instruments, National Semiconductor [6–8, 11, 12] показує, що при зміні умов навколишнього середовища похибки перетворення можуть значно (у декілька разів) перевищувати роздільну здатність, що відповідає значенню молодшого кванту.

Водночас є інший підхід, що дозволяє досягти зменшення похибки

перетворення, не використовуючи припасування ваг розрядів, тобто уникнути потреби фізичного впливу на елементи схеми. Замість технологічного припасування при цьому використовуються методи 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 і порівняно нестабільну первинну елементну базу для побудови аналогових вузлів. Слід також відзначити, що, по суті, для всіх багаторозрядних ПФІ елементна база є неточною, і нестабільною [13].

Разом з тим, у процесі експлуатації через старіння і під впливом чинників навколишнього середовища характеристики елементів будуть змінюватися, що викличе 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 [14–20] і самокалібрування [21–28], 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. Причинами появи таких відмов є зміна параметрів аналогових вузлів ПФІ, зокрема, дрейф порогу спрацювання схеми порівняння, зміна значень розрядних струмів перетворювача код-струм, номіналів елементів резистивних, конденсаторних матриць [29]. Тому, для зменшення похибок перетворення багаторозрядних ЦАП і АЦП, що виникають внаслідок дії чинників навколишнього середовища і старіння елементів, перспективним є використання методів самокоригування і самокалібрування.

Для побудови багаторозрядних ПФІ, як правило, використовують двійкові системи числення. Проте при цьому такі перетворювачі, зокрема, АЦП порозрядного врівноваження мають ряд недоліків. Так, у

двійкових АЦП, що самокоригуються, зменшується швидкодія перетворення, оскільки в цьому випадку під час основного перетворення для кожного розряду розраховується коригувальна поправка, і витрачається час на її розрахунок і введення.

Тому було запропоновано використовувати для побудови ПФІ системи числення з ваговою надлишковістю (СЧВН), оскільки в цьому 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 зміні 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 [21].

Самокоригування АЦП (ЦАП) – це окрема процедура визначення відхилень від номінальних значень параметрів вузлів АЦП (ЦАП) і їх запам'ятовування у вигляді цифрових кодів для формування протягом вказаної процедури коригувальних поправок до характеристики вхід-вихід з метою зменшення статичних похибок з перериванням при цьому процесу основного перетворення. Реалізація процедури коригування може вимагати наявності еталонних сигналів [14]. *Самокалібрування* є різновидом коригування і може виконуватися в АЦП (ЦАП), побудованому на основі СЧВН. У процесі вказаної процедури визначаються коди значень відхилень ваг старших «неточних» розрядів шляхом порівняння ваги поточного розряду, що калібрується, із певною сумою ваг групи сусідніх молодших розрядів на базі існуючих між ними математичних співвідношень з подальшим обчисленням коригувальних поправок або коригованих значень «неточних» розрядів. Використання спеціальних взірцевих мір або еталонних сигналів у цьому випадку не потрібне. Самокалібрування здійснюється з метою зменшення похибок диференціальної, інтегральної лінійності, зміщення нуля характеристики вхід-вихід, а її результати можуть багатократно використовуватися у процесі основного перетворення. При цьому на відміну від самокори-

гування поправка вводиться у цифровій формі, що не впливає на швидкодію роботи перетворювача інформації.

Регулярне виконання самокалібрування дозволить підтримувати метрологічні характеристики в межах норми, незважаючи на виникнення параметричних відмов аналогових вузлів, викликаних впливом зміни умов навколишнього середовища, а також через старіння елементів схеми протягом періоду експлуатації. Ці відмови призводять до появи похибок перетворення, але завдяки самокалібруванню пристрій функціонує в нормальному режимі. Тому в даному випадку можна говорити про забезпечення відмовостійкості багаторозрядних ПФІ протягом всього життєвого циклу.

Вирішенням питання підвищення точності і підтримання відмовостійкості перетворювачів інформації займалися наукові школи України, зокрема, професора А. І. Кондалєва, В. О. Романова, В. О. Багацького, В. А. Фабричева [30–44], П. П. Орнатського [5, 45–48], М. В. Аліпова [49–52], Б. Й. Швецького [53]. Також слід відзначити, що покращенням метрологічних характеристик ПФІ, а також систем, до яких вони входять, займалися наукові школи Ю. М. Туза, Є. Т. Володарського [54–56]. Загальні принципи побудови та покращення характеристик АЦП досліджувалися та розроблялися науковими школами колишнього СРСР, зокрема, В. Б. Смолова [14, 15, 57–64], Е. І. Гітца [2, 65–67].

Разом з радянськими і українськими науковцями питанням покращення характеристик АЦП займалися відомі науковці далекого зарубіжжя, зокрема: Ф. Гудінаф [68], В. Кестер [69–74] з корпорації Analog Device, З. Боезіглер, С. Соколов [75, 76] з Intersil Inc., Руді Дж. Ван Де Плаше, Х. Ван Дер Плог, Г. Хукзед, Хенк А. Х. Тірмір, М. Вертріх, Ральф Л. Д. Роверс [77, 78] з Philips, а також співробітники науково-дослідних підрозділів корпорацій Texas Instruments Inc., MAXIM, Linear Technology Corporation, Intel Corporation [79–95] та ін.

Питання створення відмовостійких порозрядних АЦП на основі СЧВН з 70-х років минулого століття розглядаються у Вінницькому національному технічному університеті в науковій школі професора О. Д. Азарова [4]. Причому у 70-х і на початку 80-х рр. пропонувалося відмовостійкість забезпечувати шляхом використання процедури са-

моконтролю. При цьому вважалося, що розряд ПФІ може відмовити повністю або частково, і його подальше використання у процесі врівноваження неможливе. Під час процедури самоконтролю визначалися номери розрядів, що відмовили, і виконувався обхід їх під час перетворення. Завдяки ваговій надлишковості вилучення розряду не призводило до розриву характеристики перетворення. Такий підхід дозволяв збільшити відсоток виходу годних пристроїв під час виготовлення і підтримувати відмовостійкість під час експлуатації. Проте недоліком такого підходу є те, що кількість розрядів, що вилучається як при появі катастрофічних відмови, так і параметричних, є обмеженою і залежить від характеристик системи числення, використаної для побудови надлишкового ПФІ. Починаючи з 80-х років для підтримання відмовостійкості використовуються методи самокалібрування [21–28].

Таким чином, забезпечення точності на етапі виготовлення технологічними методами, а також методами самоконтролю не гарантує стійкості вказаних пристроїв до впливу чинників навколишнього середовища в процесі експлуатації ПФІ. У результаті цього реальна точність перетворення за вказаних умов зменшується. Разом з тим, слід відзначити, що стандартизованих показників відмовостійкості при поступових відмовах для перетворювачів форми інформації не існує [5].

До того ж питання підтримки відмовостійкості багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного кодування розглянуто недостатньо у науково-технічній літературі, і має місце несистематизований підхід. Крім того, відсутні математичні моделі, що дозволяють пов'язати відмовостійкість і похибки перетворення. Причому, як відзначалося, забезпечення відмовостійкості шляхом використання процедур самокоригування і потрібних при цьому розрахунків та введень коригувальних поправок в аналоговій формі суттєво знижує швидкодію пристрою. При цьому метод самокалібрування не вимагає визначення поправки під час перетворення і не приведе до зниження швидкодії. Водночас, у процесі визначення ваг розрядів має місце накопичення методичної похибки. Тому виникла потреба у розробці нових методів самокалібрування. Слід також відзначити, що і до теперішнього часу не розглядалися питання визначення міжкалібрувального інтервалу для ПФІ з ваговою надлишковістю. Таким чином, наукова задача, пов'язана зі

створенням нового класу відмовостійких багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного кодування з ваговою надлишковістю, є актуальною.

Метою монографії є розробка методів і засобів 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. А також визначення міжкалібрувального інтервалу, дотримання якого у процесі експлуатації вказаних пристроїв дозволить підтримувати їх відмовостійкість при появі параметричних відмов аналогових вузлів.

Автори будуть вдячні за відгуки на монографію, а також за побажання щодо розвитку подальших досліджень.

РОЗДІЛ 1
ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТИПІВ ВІДМОВ І МЕТОДІВ
ПІДТРИМАННЯ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ
БАГАТОРОЗРЯДНИХ АЦП І ЦАП

**1.1. Аналіз типів відмов елементів аналогової і цифрової
електронної техніки**

Досліджуючи відмовостійкість ПФІ, треба відзначити специфічність понять, пов'язаних з нею. У цьому ключі доцільно трактувати їх визначення, що наведено в [1, 96, 97]. При цьому в електронній техніці можна виділити два стани об'єкта. Під об'єктом будемо мати на увазі цифрову або аналогову систему чи будь-яку її частину. Відповідно до [96] стан об'єкта, коли від здатен виконувати усі потрібні функції, називається працездатним. Натомість стан, коли об'єкт нездатний виконувати хоч би одну з потрібних функцій, називається непрацездатним. Неможливість об'єкта виконувати всі потрібні функції характеризується поняттям повна несправність.

Відмовою називається подія, що полягає у втраті об'єктом здатності виконувати потрібну функцію, тобто у порушенні працездатності стану об'єкта. Треба розрізнити поняття відмова і несправність. Відмовою є подія, а несправність – це стан об'єкта і причина відмови. Разом з тим, в аналоговій техніці поняття відмова є ширшим порівняно з цифровою.

Виділяють різні типи відмов, класифікаційну схему яких показано на рис. 1.1. При цьому під повною відмовою розуміється відмова, що призводить до повної неспроможності об'єкта виконувати жодну з потрібних функцій [96]. Тобто при появі повної відмови виріб, компонент, елемент повністю перестає працювати і не може продовжувати функціонувати без ремонту або заміни. Повна відмова є наслідком порушення фізичної структури об'єкта [29], наприклад, пробій р-n-переходу, обрив провідника, коротке замикання елементів і т. п. Повні відмови характерні для цифрових схем, що складаються з десятків і

сотень тисяч компонентів, натомість аналогова схема – це десятки-сотні елементів. Тому ймовірність появи повної відмови для цифрової техніки значно більша, ніж для аналогової.

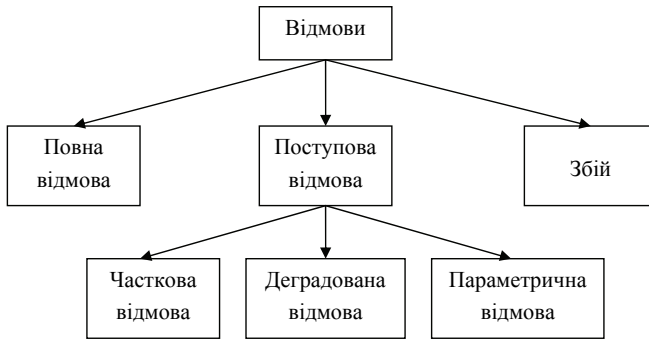


Рис. 1.1. Класифікація відмов

Разом з тим, для аналого-цифрової техніки (ЦАП і АЦП) переважаючи є поступові часткові відмови і збої, оскільки саме вони проявляються в процесі експлуатації. При цьому повні відмови перетворювачів виявляються ще під час виготовлення і такі пристрої, як правило, вилучаються зі складу «годних».

Збій – це самоусувна відмова або одноразова відмова. При цьому для ПФІ збій типу постійне включення розряду ЦАП не дозволяє правильно виконувати перетворення, а відповідно робить неможливою експлуатацію пристрою. При збої типу невмикання розряду ЦАП треба виконувати перевірку можливості правильного перетворення [4].

Поступова відмова – відмова, спричинена поступовими змінами значень одного чи декількох параметрів об'єкта [96]. Такі відмови також називають частковими, деградованими, параметричними. У [96] під частковою відмовою розуміють таку, що призводить до неспроможності об'єкта виконувати частину з потрібних функцій. Водночас, деградовані відмови – це такі, що спричинені процесами деградації в об'єкті при дотриманні усіх встановлених правил і норм проектування, виготовлення та експлуатації. Вдалим терміном, що чітко описує відмови ПФІ, викликані часом і постійним відхиленням параметрів об'єкта, є параметрична відмова. Саме цей термін правильно відобра-

жає характер і причину виникнення відмови, тому далі буде використуватись саме він. Прикладами параметричних відмов можуть бути зміни коефіцієнта передачі підсилювача, опору резисторів, ємності, зміщення порогу спрацювання компаратора і т. п.

Можна виділити первинні і вторинні параметричні відмови. Первинні – це ті, що з’являються відразу після виготовлення пристрою через недосконалість технології. Вторинні – це параметричні відмови, що проявляються у поступовому змінненні значень одного чи декількох параметрів об’єкта в процесі експлуатації. Проте у цьому випадку пристрій продовжує працювати, але не так, як того вимагають технічні умови. Зміна параметрів аналогових вузлів ПФІ відбувається внаслідок дії експлуатаційних чинників, наприклад, температури, радіації, вологості, а також у результаті старіння матеріалів.

При цьому у рамках параметричних відмов стосовно зміни параметрів елементів виділяють відновлювальні і невідновлювальні. Відновлювальні зміни параметрів викликаються змінами температури, вологості повітря, тиску и т. д. Після повернення вказаних факторів навколишнього середовища до нормованих значень, значення параметрів елементів зазвичай відновлюються. Найчастіше враховується лише змінення параметра X елемента під впливом температури [10, 98], який оцінюють температурним коефіцієнтом α_X . Значення величини α_X визначається як

$$\alpha_X = \frac{X_1 - X_0}{X_0(T_1 - T_0)},$$

де X_0 – значення параметра X при температурі T_0 ; X_1 – значення параметра при температурі T_1 .

Невідновлювальні зміни параметрів елементів викликаються накопиченням змін у матеріалах, що обумовлені фізико-хімічними процесами в ході експлуатації [10, 98]. Ці зміни оцінюються коефіцієнтом старіння β_X , що визначається як

$$\beta_X = \frac{X_1 - X_0}{X_0(t_1 - t_0)},$$

де X_0 – значення параметра X в момент часу t_0 ; X_1 – значення параметра X в момент часу $t_1 > t_0$.

Так значення параметру в момент часу t при температурі T можна оцінити як

$$X = X_0(1 + \alpha_X(T - T_0))(1 + \beta_X t),$$

де X_0 – початкове значення параметра X в момент часу $t = 0$ при температурі $T = T_0$.

Параметрична відмова з’явиться, якщо параметр X елемента в процесі змін початкового значення X_0 досягне $X_{гр}$, що відповідає значенню межі допуску. Варто зазначити, що виготовити партію виробів з абсолютно однаковими значеннями параметрів не можливо [9, 10, 99]. Окремі зразки мають відхилення від необхідних значень, причому ці відхилення також підлягають нормальному закону [10, 99–101]. Придатними вважають лише ті вироби, визначальний параметр яких знаходиться в межах допуску.

Сучасні технології виготовлення елементної бази аналогових вузлів багаторозрядних ПФІ порозрядного кодування, а також використання процедур самокоригування дозволять створювати провідним фірмам світу, зокрема, Analog Devices, Texas Instruments Incorporated, Linear Technology Corporation, Maxim Integrated Products 14–18-розрядні АЦП із гарними статичними характеристиками (табл. 1.1, 1.2) [6, 7, 11, 12].

Таблиця 1.1

Характеристики багаторозрядних АЦП порозрядного кодування провідних фірм світу, в яких використовується самокоригування

Модель	Розрядність	Час перетворення, мкс	Інтегральна нелінійність, ОМР	Диференціальна нелінійність, ОМР
AD7690	18	2,5	$\pm 3,5$	від -2 до +1
AD7684	16	10	± 3	± 2
AD7946	14	2	± 2	від -2 до +1
ADS8324	14	20	± 2	± 2
TLC4545	16	5	$\pm 2,5$	± 2
LTC1603	16	4	± 3	± 2
MAX1165	16	6	± 4	± 2

Таблиця 1.2

Характеристики багаторозрядних ЦАП паралельної дії, що самокоригуються, провідних фірм світу

Модель	Розрядність	Інтегральна нелінійність, ОМР	Диференційна нелінійність, ОМР	Діапазон робочих температур, °С
AD760	18	±4	±4	-40 до +85
AD9786	16	±4	від -1 до +2	-40 до +85
AD9779	16	±4	±4	-40 до +85
LTC2755	16	±3	від -2 до +3	-40 до +85
MAX5661	16	±4	±2	-40 до +105
DAC5687	16	±4	±4	-40 до +85

Варто відзначити, що похибки інтегральної і диференціальної лінійності ПФІ (див. табл. 1.1, 1.2) мають значення кількох одиниць молодшого розряду, тобто жодному виробнику не вдалося забезпечити похибки лінійності на рівні 1 ОМР. При цьому виробники зазначають, що при функціонування АЦП у широкому діапазоні температур з'являються параметричні відмови, тобто значення похибки виходить за межі допуску [102]. Для їх усунення необхідно переводити АЦП у спеціальний режим самокоригування. Лише такий підхід дозволяє утримувати значення похибок на заданому рівні при змінні умов навколишнього середовища в процесі експлуатації [102].

Разом з тим, у табл. 1.3, 1.4 наведено типові характеристики тонкоплівкових резисторів і конденсаторів, що використовуються як базові елементи при побудові ЦАП [9, 10]. Аналіз таблиць показує, що значення абсолютного допуску на виготовлення основних типів резисторів знаходиться в межах $\pm 5 \dots \pm 10 \%$, а відносного – $\pm 1 \dots 2 \%$. Разом з тим, сучасні технології дозволяють створювати високоточні інтегральні конденсатори, що мають всього $\pm 1 \%$ відносного допуску і $\pm 20 \%$ абсолютного.

Таблиця 1.3

Типові характеристики тонкоплівкових резисторів

Тип резистора	Опір квадрата плівки, Ом/□	Температурний коефіцієнт (ppm/°C)	Абсолютний допуск, %	Відносний допуск, %
Ta	10 – 1000	±100	±5	±1
Ni-Cr	40 – 400	±100	±5	±1
SnO ₂	80 – 4000	0 – 1500	±8	±2
CrSiO	30 – 2500	±50 – ±150	±10	±2

Типові характеристики МОН конденсаторів

Параметри конденсатора	Матеріал діелектрика	
	SiO ₂	Si ₃ N ₄
Ємність(пФ/м ²)	0,25...0,4	0,5...1,0
Відносна діелектрична константа	2,7...4,2	3,5...9
Напруга пробою (V)	50...100	50...100
Абсолютний допуск (%)	±20	±20
Відносний допуск (%)	±1	±1
Температурний коефіцієнт (од/°C)	±20	±4 до ±10

У табл. 1.5 показано основні характеристики інтегральних *n-p-n* транзисторів, зокрема, коефіцієнт підсилення β , напругу база-емітер V_{BE} і напругу зворотного пробою *p-n*-переходу V_{EBO} , що мають значні допуски. Використання для побудови ПФІ компонентів з такими допусками (одиниці-десятки відсотків) дає можливість створювати 6-, 8-розрядні перетворювачі з нормованим рівнем похибки [9].

Таблиця 1.5

Типові характеристики інтегральних *npn* транзисторів

Параметр транзистора	Діапазон значень	Абсолютний допуск,	Відносний допуск	Температурний коефіцієнт
β	50...300	±20 %	±5 %	+5000... +7000 ppm/°C
V_{BE}	0,6...0,7 V	±20 mV	±1 mV	-2 mV/°C
V_{EBO}	6...9 V	±200 mV	±25 mV	+2...+6 mV/°C

Отже, при проектуванні схем багаторозрядних ПФІ у першу чергу необхідно забезпечити статичні характеристики, що відповідають нормам [96]. При цьому в процесі експлуатації можуть з'явитися параметричні відмови аналогових вузлів ЦАП і АЦП, які не порушують роботи пристрою, а тільки впливають на його точність. Підтримання нормованого рівня похибки перетворення АЦП і ЦАП протягом всього життєвого циклу експлуатації треба асоціювати із поняттям відмовостійкості [103, 104]. Відмовостійкість ПФІ – це властивість утримувати похибку перетворення у заданих межах шляхом самокалібрування характеристики перетворення, незважаючи на змінення протягом циклу експлуатації параметрів аналогових вузлів під дією чинників,

що впливають. При цьому поняття надійності треба розглядати лише по відношенню до катастрофічних відмов, а часткові параметричні відмови враховувати при оцінці точності перетворювача [3].

Чинники, що впливають на параметри аналогових вузлів, – це зміна умов навколишнього середовища (температури, вологості, тиску, радіації, механічна деформація та ін.); старіння; зміна умов експлуатації (напряга живлення, споживана потужність, струми робочих точок елементів). Разом з тим, для біполярних транзисторів критичними параметрами, зміна яких приводить до варіювання параметрів аналогових вузлів, є зміна напруги база-емітер $\Delta U_{бе}(T, t, U_{ж}, I_{зм})$, коефіцієнта підсилення $\Delta \beta(T, t, U_{ж}, I_{зм})$; для польових транзисторів це – зміна напруги затвор-витік $\Delta U_{зв}(T, t, U_{ж}, I_{зм})$, крутизни $\mu(T, t, U_{ж}, I_{зм})$; зміна номіналів конденсаторів $\Delta C(T, t, P_{мех})$ і резисторів $\Delta R(T, t, P_{мех})$.

1.2. Вплив часткових параметричних відмов елементів аналогових вузлів на похибки перетворювачів форми інформації (ПФІ)

Статичні характеристики перетворення ЦАП, АЦП у координатах $A_{вих} = f(K_{вх})$ і $K_{вих} = f(A_{вх})$ можуть бути за формою дещо схожими, однак мають відмінності. Так, при послідовному зростанні значення вхідного цифрового сигналу $K_{вх}(t)$ на вході ЦАП у діапазоні перетворення $D_{пер}$ через одиницю молодшого розряду (ОМР) вихідних сигнал $A_{вих}$ утворює ступінчасту криву. При відсутності параметричних відмов вузлів ЦАП середні точки ступенів будуть розміщені на ідеальній прямій, що з'єднує початкову і кінцеву точки діапазону. Ця пряма відповідає ідеальній характеристиці перетворення (рис. 1.2а).

Водночас, реальна характеристика буде суттєво відрізнятися від ідеальної, зокрема, формою ступенів, розміщенням в осях координат. Кількісні відмінності ідеальної і реальної характеристик перетворення описуються у вигляді статичних похибок, а також деяких інших параметрів (див. рис. 1.2а).

Оскільки ваги розрядів ЦАП, що входить до структури АЦП, мають допуск при виготовленні, а також змінюються в часі під час експлуатації під впливом чинників навколишнього середовища і через старіння, характеристика перетворення АЦП набуває вигляду, показаного на рис. 1.2б, тобто мають місце статичні похибки перетворення.

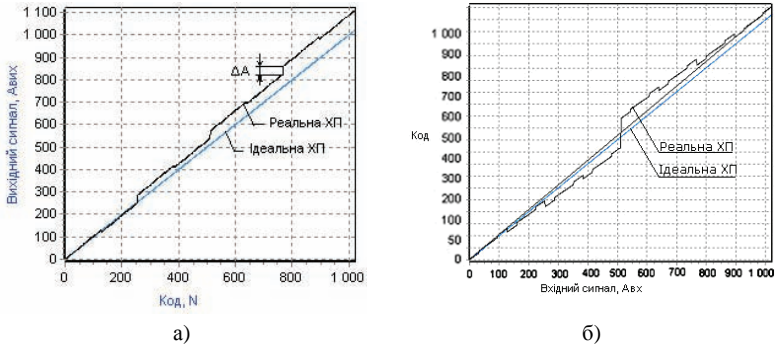


Рис. 1.2. Характеристики перетворення ПФІ: а) ЦАП паралельної дії; б) АЦП порозрядного врівноваження

Основні статичні похибки перетворення АЦП і ЦАП – це похибки масштабу, інтегральної та диференціальної лінійності, зміщення нуля [105–107]. Так кількість розрядів визначає роздільну здатність ЦАП. Це є приріст вихідного сигналу $A_{\text{вих}}$ при перетворенні сусідніх значень $K_{\text{вх}}(t)$, тобто з різницею на один молодший квант. При цьому під роздільною здатністю АЦП розуміють величину, зворотну максимальному числу кодових комбінацій на виході АЦП.

Роздільна здатність визначається у відсотках, розрядах або децибелах і характеризує потенційні можливості АЦП з точки зору максимальної точності перетворення неперервної величини у цифровий код. Роздільна здатність відповідає приросту вхідного сигналу АЦП $A_{\text{вх}}$ при зміні коду K_i на одиницю молодшого розряду. Цей приріст є кроком квантування. Для двійкових кодів номінальне значення кроку квантування

$$\tilde{q} = A_{\text{вих MAX}} / (2^n - 1),$$

де $A_{\text{вих MAX}}$ – максимальне значення вихідного сигналу ЦАП; n – розрядність ЦАП.

Різниця між ідеальним і реальним значеннями вихідного сигналу $A_{ВИХ\ MAX}$ при відсутності зміщення нуля називається похибкою масштабу. Похибка масштабу є мультиплікативною складовою загальної похибки. Як правило вона представляється у ОМР або відсотках:

$$\Delta_M = \frac{\varepsilon_{FS}}{A_{ВИХ\ MAX}} \cdot 100 \% .$$

Зміщення нуля – це значення вихідного сигналу $A_{ВИХ}$, коли вхідний код ЦАП рівний нулю. Ця похибка є адитивною складовою загальної похибки. Вимірюється в ОМР або відсотках від діапазону перетворення:

$$\Delta_0 = \frac{\varepsilon_{OFF}}{A_{ВИХ\ MAX}} \cdot 100 \% .$$

Похибка інтегральної нелінійності – це максимальне відхилення реальної характеристики перетворення від лінії, що з'єднує початкову і кінцеву точки діапазону перетворення. Нелінійність визначається у ОМР або відносних одиницях. Для характеристики, що показана на рис. 1.2,

$$\Delta_{ИНЛ} = \frac{\varepsilon_i}{A_{ВИХ\ MAX}} \cdot 100 \% .$$

Диференціальна нелінійність – це максимальна зміна відхилення реальної характеристики перетворення від оптимальної при переході від одного значення вхідного коду до іншого сусіднього. Зазвичай вона визначається у відносних одиницях або одиницях ОМР. Для характеристики перетворення, що зображена на рис. 1.2,

$$\Delta_{ДНЛ} = \frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}}{A_{ВИХ\ MAX}} \cdot 100 \% .$$

Монотонність характеристики перетворення – це збільшення (зменшення) вихідного сигналу ЦАП при збільшенні (зменшенні) вхідного коду. При цьому характеристика є монотонною, якщо немає стрибків, і стрибкоподібна характеристика може мати розриви. ЦАП монотонний, якщо вихідний сигнал або збільшується, або залишається

ЛІТЕРАТУРА

1. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення : ДСТУ 3433–96 (ГОСТ 27.005–97). – [Чинний від 01.01.1999]. – К. : Держстандарт України, 1998. – 46 с.
2. Гитис Э. И. Аналого-цифровые преобразователи / Э. Гитис, Е. Пискулов. – М. : Энергоиздат, 1981. – 360 с.
3. Моисеев В. С. Системное проектирование преобразователей информации / Моисеев В. С. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 255 с.
4. Азаров А. Д. Исследование принципов построения и разработка преобразователей информации на основе кодов с иррациональными основаниями : автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.11.16 / А. Д. Азаров. – Харьков, 1980. – 16 с.
5. Орнатский П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / Орнатский П. П. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – К. : Вища школа, 1983. – 455 с.
6. High Speed, High Accuracy, 14-Bit, 16-Bit, and 18-Bit PulSAR ADCs [Електронний ресурс] / Analog Devices // офіційний сайт. Режим доступу : <http://www.analog.com/static/imported-files/overviews/PulSAR.pdf>.
7. Selecting A/D Converters [Електронний ресурс] / Intersil Corporation. Application Note // офіційний сайт. Режим доступу : <http://www.intersil.com/data/an/an016.pdf>.
8. Amplifier and Data Converter Guide [Електронний ресурс] / Texas Instruments // офіційний сайт. Режим доступу : <http://focus.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?literatureNumber=slyb115c&fileType=pdf>.
9. Alan B. Grebene. Bipolar and MOS Analog Integrated Circuit Design / Alan B. Grebene, 2003. – 879 p.
10. Alan Hasting. The Art of Analog Layout / Hasting A, 2001. – 539 p.
11. A/D Converter Design Guide [Електронний ресурс] / Maxim Integrated Products // офіційний сайт. Режим доступу : http://www.maxim-ic.com/design_guides/en/AD_CONVERTERS_28.pdf.
12. Nicholas Gray. ABCs of ADCs [Електронний ресурс] / National

Semiconductor // офіційний сайт. Режим доступу : http://www.national.com/appinfo/adc/files/ABCs_of_ADCs.pdf.

13. Walt Kester. The Data Conversion Handbook [Електронний ресурс] / Analog Devices // офіційний сайт. Режим доступу : http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-06/data_conversion_handbook.html.

14. Смолов В. Б. Полупроводниковые кодирующие и декодирующие преобразователи напряжений / В. Смолов, Н. Смирнов. – Л. : Энергия, 1967. – 312с.

15. Грушвицкий Р. И. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем / Р. И. Грушвицкий, А. Х. Мурсаев, В. Б. Смолов. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 160 с. – ISBN 5-283-04450-5.

16. Albert O'Grady. Getting 14-Bit Performance from a 32-Channel 14-Bit String DAC [Електронний ресурс] / Analog Devices // офіційний сайт. Режим доступу : www.analog.com/library/analogDialogue/archives/37-02/calibration.pdf.

17. Phillip E. Allen. CMOS Analog Circuit Desing / Phillip E. Allen, Douglas R. Holberg. Oxford : Oxford University Press, 2002. – 784 p.

18. Goodenough F. Dual 18-bit ADC chip grabs 20-kHz audio // Electronic Design. – 1989. – vol. 14.

19. Naylor J. 18-bit-AD-Umsetzer auf einem Chip // Electronic Industrie. – 1989. – № 9.

20. Mosley J.D. Self-calibrating 16-bit A/D converter quarantees no missing codes to 50 kHz // EDN. – 1987. – vol. 32, № 2.

21. Азаров О. Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення. Монографія / Азаров О. Д. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2004. – 260с.

22. Захарченко С. М. Самокалібровані АЦП із накопиченням заряду на основі надлишкових позиційних систем числення. Монографія / Захарченко С. М., Азаров О. Д., Харьков О. М. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2005. – 235 с.

23. Крупельницький Л. В. Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів. Монографія / Л. Крупельницький, О. Азаров. – Вінниця : УНІ-

ВЕРСУМ–Вінниця, 2005. – 167 с.

24. Біліченко Н. О. Високоточні аналого-цифрові перетворювачі з перерозподілом заряду на основі інформаційної надлишковості : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.05 / Н. О. Біліченко. – Вінниця, 2001. – 16 с.

25. Азаров О. Д. Високолінійні порозрядні АЦП з ваговою надлишковістю для систем реєстрації і оброблення сигналів. Монографія / Азаров О. Д., Архипчук О. А., Захарченко С. М. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2005. – 125 с.

26. Харьков О. М. Швидкодіючі високоточні АЦП із перерозподілом заряду з ваговою надлишковістю, що самокалібруються : автореф. дис на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.05 / О. М. Харьков. – Вінниця, 2007. – 16 с.

27. Азаров О. Д. Багатоканальні ІВС опрацювання стрибкоподібних сигналів на базі АЦП із ваговою надлишковістю. Монографія / О. Азаров, А. Снігур. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2008. – 138 с.

28. Азаров О. Д. Обчислювальні АЦП і ЦАП, що самокалібруються, для систем цифрового оброблення аналогових сигналів. Монографія / О. Азаров, О. Коваленко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2006. – 147 с.

29. Стрельников В. П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем / В. Стрельников, А. Федухин. – К. : Логос, 2002. – 486 с.

30. Кондалев А. И. Преобразователи формы информации компьютерного типа / Кондалев А. И. – К. : Знание, 1990. – 46 с.

31. Багацкий В. А. Современные аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи / Багацкий В. А. – К. : Знание УССР, 1980. – 21 с.

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

33. Вонятыцкий А. Ю. Статистические модели ЦАП на источниках тока / Вонятыцкий А. Ю., Кондалев А. И. – К., 1988. – 21 с. – (Препринт / АН УССР, ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова; 88-64).

34. Кондалев А. И. Вопросы проектирования преобразователей

формы информации / Кондалев А. И., Никитин А. Н., Багацкий В. А. [и др.]; под общ. ред. А. Кондалева. – К. : Наук. думка, 1977. – 242 с.

35. Высокопроизводительные преобразователи формы информации / [Кондалев А. И., Багацкий В. А., Романов В. А., Фабричев В. А.]. – К. : Наукова думка, 1987. – 280с.

36. Кондалев А. И. Системные преобразователи формы информации / Кондалев А. И. – К. : Наук. Думка, 1974. – 334с.

37. Кондалев А. И. Комбинированный аналого-цифровой преобразователь / Кондалев А. И., Овчарук М. Е., Сиверский М. П. // Устройства и элементы систем автоматизации научного эксперимента. – Новосибирск, 1970. – С. 331–335.

38. Вклад Украины в развитие системных преобразователей формы информации / Кондалев А. И., Романов В. А., Багацкий В. А., Клочан П. С. // Труды Междунар. Симпозиума «Компьютеры в Европе. Прошлое, настоящее и будущее». – К. : ИК НАН Украины. – 1998. – 130 с.

39. Кондалев А. И. Преобразователи формы информации для контрольно-измерительных систем и вычислительных комплексов / Кондалев А. И., Клочан П. С., Лаврентьев В. Н. // Проблемы создания преобразователей формы информации. – К. : Наукова думка, 1980. – Ч.2. – С. 12-20.

40. Преобразователи формы информации для малых ЭВМ / [А. И. Кондалев, В. А. Багацкий, В. А. Романов, В. А. Фабричев]. – К. : Наукова думка, 1982. – 312 с.

41. Преобразователи формы информации с обработкой данных / [Багацкий В. А., Грешищев Ю. М., Самус И. В. и др.]; под ред. А. И. Кондалева. – К. : Наукова думка, 1992. – 264 с. – ISBN 5-12-003298-2.

42. Романов В. А. Теория, методы построения и техническая реализация микропроцессорных преобразователей формы информации с повышенной надежностью и производительностью : автореф. дис. на соискание учен. степени д-ра техн. наук : спец. 05.13.05 / В. А. Романов. – Киев, 1994. – 34 с.

43. Романов В. А. Аналого-цифровые микропроцессоры в информационно-вычислительных и управляющих системах / Романов В. А. – К. : Знание, 1984. – 116 с.

44. Фабричев В. А. Теория и практика создания методов и средств электромагнитной совместимости устройств преобразования формы информации : автореф. дис. на соискание учен. степени д-ра техн. наук : спец. 05.13.05 / Фабричев В. А. – Киев, 1994. – 38 с.
45. Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы (аналоговые и цифровые) / Орнатский П. П. – [5-е изд., перераб. и доп.] – К. : Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 504 с.
46. Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы / Орнатский П. П. – К. : Вища школа, 1973. – 364 с.
47. Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы / Орнатский П. П. – К. : Вища школа, 1980. – 560 с.
48. Орнатский П. П. Измерительный эксперимент : учебное пособие / П. Орнатский, Н. Пономаренко. – Киев : КПИ, 1979. – 112 с.
49. Алипов Н. В. Помехоустойчивые алгоритмы функционирования преобразователей формы информации // Проблемы создания преобразователей формы информации : V Всесоюзный симпозиум, 1984 г. : тезисы доклада. – К. : Наук. думка, – 1984. – Ч. 1. – С. 107–109.
50. Алипов Н. В. Алгоритмы функционирования параллельно-последовательных преобразователей формы информации, корректирующих динамические ошибки / Алипов Н. В. // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 1985. – №2. – С. 57–64.
51. Алипов Н. В. Об одном классе корректирующих алгоритмов аналого-цифрового преобразования / Алипов Н. В. // Радиотехника. – 1985. – № 1. – С. 120–125.
52. Алипов Н. В. Разработка теории методов решения задач помехоустойчивого поиска и преобразования информации : автореф. дис. на соискание учен. степени д-ра техн. наук : спец. 05.13.05 / Алипов Н. В. – Харьков, 1986. – 54 с.
53. Швецкий Б. И. Электронные цифровые приборы / Швецкий Б. И. – [2-е изд, перераб. и доп.] – К. : Техника, 1991. – 191 с.
54. Туз Ю. М. Структурные методы повышения точности измерительных устройств / Туз Ю. М. – К. : Вища шк. Головное изд-во, 1976. – 285 с.

55. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю / [Володарський С. Т., Кухарчук В. В., Поджаренко В. О., Сердюк Г. Б.]. – Вінниця : Велес, 2001. – 219 с.

56. Володарский Е. Т. Планирование, организация измерительного эксперимента / Володарский Е. Т., Малиновский Б. Н., Туз Ю. М. – К. : Вища школа, 1987. – 280 с.

57. Смолов В. Б. Аналого-цифровые комплексы / Смолов В. Б., А. В. Анисимов, Р. Ш. Исмаилов. – Л. : ЛЭТИ, 1980. – 96 с.

58. Балашов Е. П. Аналоговые ЗУ управляющих и вычислительных систем / Балашов Е. П., Сидоров В. М., Смолов В. Б. // Хранение информации в кибернетических устройствах. – 1969. – № 2. – С. 223–235.

59. Вопросы построения интегральных преобразователей напряжения в код / [Смолов В. Б., Шмидт В. К., Варлинский Н. Н. и др.] // Вопросы преобразования информации. – 1972. – Вып. 6. – С. 3–9.

60. Смолов В. Б. Микроэлектронные цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи информации / Смолов В. Б. – Л. : Энергия, 1976, – 336 с.

61. Мурсаев А. Х. Точные ключи, операционные устройства запоминания напряжений на канальных транзисторах / Мурсаев А. Х., Смолов В. Б., Угрюмов Е. П. – Л. : ЛДНТП, 1972. – 30 с.

62. Чернявский Е. А. Системы автоматизированного проектирования средств ИИТ / Е. А. Чернявский, В. Б. Смолов, А. В. Минаев. – Л. : ЛЭТИ, 1988. – 58 с.

63. Смолов В. Б. Вычислительные преобразователи с цифровыми управляемыми сопротивлениями / Смолов В. Б. – М. : Госэнергоиздат, 1961. – 135 с.

64. Смолов В. Б. Функциональные преобразователи информации / Смолов В. Б. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 247 с.

65. Автоматизация проектирования аналого-цифровых устройств / [Гитис Э. И., Собкин Б. Л., Подколзин А. Н. и др.] ; под ред. Э.И. Гитиса. – М : Энергоатомиздат, 1987. – 182 с.

66. Гитис Э. И. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств / Гитис Э. И. – М. : Энергия, 1970. – 400 с.

67. Гитис Э. И. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств / Гитис Э. И. – М. : Энергия, 1975. – 448 с.
68. Гудинаф Ф. Новые области применения аналого-цифровых преобразователей с высоким разрешением // Электроника. – 1991. – №7. – С. 89–96.
69. Walt Kester. Drive Circuitry is Critical to High-Speed Sampling ADCs / Walt Kester // Electronic Design Special Analog Issue. – Nov. 7, 1994. – P. 43–50.
70. Walt Kester. Basic Characteristics Distinguish Sampling A/D Converters / Walt Kester // EDN. – Sept. 3, 1992. – P. 135–144.
71. Walt Kester. Peripheral Circuits Can Make or Break Sampling ADC Systems / Walt Kester // EDN. – Oct. 1, 1992. – P. 97–105.
72. Walt Kester. Layout, Grounding, and Filtering Complete Sampling ADC System / Walt Kester // EDN. – Oct. 15, 1992. – P. 127–134.
73. Walt Kester. High speed sampling and high speed ADC / Walt Kester // High speed design techniques. – Analog Devices Inc. – 1999. – P. 93.
74. Walt Kester. Grounding in High Speed Systems / Walt Kester, James Bryant / Walt Kester // High speed design techniques. – 1999. – P. 6.
75. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы. Пер. с англ. / Соклоф С. – М. : Мир, 1988. – 583 с.
76. Zlya Boyaciglller. Increase analog-system accuracy with a 14-bit monolithic ADC / Zlya Boyaciglller, Steve Sockolov. – EDN. – august 18, 1982. – P. 137–143.
77. Rudy J. Van De Plassche. A Monolithic 14 Bit A/D Converter / Rudy J. Van De Plassche, Hans J. Schouwenaars // IEEE Journal of Solid State Circuits. – Dec. 1982. – Vol. SC-17, No. 6. – P. 1112–1117.
78. Rudy J. Van De Plassche. A Monolithic 14 Bit D/A Converter / Rudy J. Van De Plassche, Dick Goedhart // IEEE Journal of Solid State Circuits. – Jun. 1979. – Vol. SC – 14, No. 3. – P. 552–556.
79. Steve Ruscak. Using Histogram Techniques to Measure A/D Converter Noise / Steve Ruscak, Larry Singer // Analog Dialogue. – 1995. – Vol. 29-2. – P. 35–41.
80. Carl Moreland. An 8-bit 150MSPS Serial ADC/ Carl Moreland //

ISSCC Digest of Technical Papers. – 1995. – Vol. 38. – P. 272.

81. Carl Moreland. An Analog-to-Digital Converter Using Serial-Ripple Architecture / Carl Moreland // Masters' Thesis, Florida State University College of Engineering, Department of Electrical Engineering. – 1995. – P. 56.

82. Practical Analog Design Techniques // Analog Devices. – 1995. – Chapter 4, 5, and 8.

83. Linear Design Seminar // Analog Devices. – 1995. – Chapter 4, 5.

84. Howard E. Hilton. A 10MHz Analog-to-Digital Converter with 110dB Linearity / Howard E. Hilton // H.P. Journal. – October 1993. – P. 105–112.

85. Lee S. and Lee J. Comments on «Comments on 'interstage gain-proration technique for digital-domain multistep ADC calibration'» // IEEE Trans. Circuit Syst. II. – July 2001. – Vol. CAS-48. – P. 745–749.

86. Rombouts P. Comments on «Interstage Gain-Proration Technique for Digital-Domain Multistep ADC Calibration» / Rombouts P., Weyten L. // IEEE Trans. Circuit Syst. II. – August 1999. – Vol. CAS-46. – P. 1114–1116.

87. Lee S. Interstage gain proration technique for digital-domain multistep ADC calibration / Lee S., Song B. // IEEE Trans. Circuit Syst. II. – January 1994. – Vol. CAS-41. – P. 12–18.

88. Explicit analysis of channel mismatch effects in time-interleaved ADC systems / [Kurosawa N., Kobayashi H., Maruyama K. and others]. // IEEE Trans. Circuit Syst. I. – March 2001. – Vol. CAS-48. – P. 261–271.

89. Jin H. A digital-background calibration technique for minimizing timing-error effects in time-interleaved ADCs / Jin H., Lee E. K. F. // IEEE Trans. Circuit Syst. II. – July 2000. – Vol. CAS-47. – P. 603–613.

90. Gustavsson M. A global passive sampling technique for high-speed switched-capacitor time-interleaved ADCs / Gustavsson M., Tan N. N. // IEEE Trans. Circuit Syst. II. – September 2000. – Vol. CAS-47. – P. 821 – 831.

91. Galton I. Digital cancellation of D/A converter noise in pipelined A/D converters / Galton I. // IEEE Trans. Circuit Syst. II. – March 2000. – Vol. CAS-47. – P. 185–196.

92. Maulik P. C. Analysis of leakage current induced nonlinearity in

resistor-ladder based data converters / Maulik P. C. // IEEE Trans. Circuit Syst. II. – February 2000. – Vol. CAS-47. – P. 136–137.

93. Rombouts P. A digital error-averaging technique for pipelined A/D conversion / Rombouts P., Weyten L. // IEEE Trans. Circuit Syst. II. – September 1998. – Vol. CAS-45. – P. 1321–1323.

94. Capofreddi P. D. The use of linear models in A/D converter testing / Capofreddi P. D., Wooley P. D. // IEEE Trans. Circuit Syst. I. – December 1997. – Vol. CAS-44. – P. 1105–1113.

95. Pace P. E. Optimum analog preprocessing for folding ADC's / Pace P. E., Schafer J. L. // IEEE Trans. Circuit Syst. II. – February 1997. – Vol. 42. – P. 825–829.

96. Надійність техніки. Терміни та визначення : ДСТУ 2860-94. – [Чинний від 28.12.94]. – К. : Держстандарт України, 1994 – 91 с.

97. Засоби обчислювальної техніки. Відмовостійкість і живучість. Методи випробувань : ДСТУ 2504-94. – [Чинний від 01.07.1995]. – К. : Держстандарт України, 1994 – 45 с.

98. Никулин С. М. Надежность элементов радиоэлектронной аппаратуры / Никулин С. М. – М. : Энергия, 1979. – 80 с.

99. Сотсков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники / Сотсков Б. С. – М. : Высшая школа, 1970. – 270 с.

100. Hans Camenzind. 700 Series 20v Bipolar Array Design Manual / Hans Camenzind. – 2005. – P. 192.

101. Hans Camenzind. Designing Analog Chips / Hans Camenzind. – 2005. – P. 242.

102. AD7621 : 16-Bit, 2 LSB INL, 3 MSPS PulSAR ADC [Електронний ресурс] / Analog Devices // офіційний сайт. Режим доступу : http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7621.pdf.

103. Иванов В. Н. Мощные интегральные усилители / Иванов В. Н., Иванов В. В. – Ленинград : ЦНИИ «Румб», 1987. – 145 с.

104. Иванов В. Н. Проектирование аналоговых схем на специализированных БИС / В. Иванов, В. Иванов. – Ленинград : ЦНИИ «Румб», 1988. – 139 с.

105. Перетворювачі цифрового коду у напругу або струм вимірювальні. Загальні технічні вимоги : ДСТУ 3636-98 (ГОСТ 30606-98). –

[Чинний від 01.01.1999]. – К. : Держстандарт України, 1998 – 46 с.

106. Перетворювачі вимірювальні напруги та струму цифрові. Загальні технічні вимоги : ДСТУ 3744–98 (ГОСТ 30605-98). – [Чинний від 01.01.1999]. – К. : Держстандарт України, 1998 – 46 с.

107. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Волович Г. И. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. – 528 с.

108. Ракитин В. В. Интегральные схемы на КМОП-транзисторах / Ракитин В. В. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. – 308 с.

109. Anthony Collins. Solid State Solutions for Electricity Metrology [Електронний ресурс] / Analog Devices // офіційний сайт. Режим доступу : http://www.analog.com/static/imported-files/tech_articles/16673279729875solid_state.pdf.

110. Walt Kester. Which ADC Architecture Is Right for Your Application? [Електронний ресурс] / Analog Devices // офіційний сайт. Режим доступу : <http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-06/architecture.pdf>.

111. Mike Walsh. 14-Bit Monolithic ADCs : First to Sample Faster than 1 MSPS [Електронний ресурс] / Mike Walsh, Larry Singer, Joe DiPilato. Analog Devices // офіційний сайт. Режим доступу : <http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/31-2/14bit.html>

112. Гельман М. М. Системные аналого-цифровые преобразователи и процессоры сигналов / Гельман М. М. – М. : Мир, 1999. – 559 с.

113. Пат. 6707403В1 США. НКИ 341/120. Analog to digital converter with a calibration circuit for compensating for coupling capacitor errors, and a method for calibrating the analog to digital converter / Christopher Peter Hurrell. № 10/292116; заявл. 12.11.2002; опубл. 16.03.2004. – 25 с.

114. А. с. 1216829 СРСР, МКИ Н 03 М 1/66. Цифроаналоговый преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев, В. Я. Стейскал, Н. А. Масленикова, Р. С. Оганесян. – №3783033; заявл. 6.07.1984; опубл. 8.11.1985, Бюл. №9. – 20 с.

115. Высокопроизводительные преобразователи информации на основе избыточных систем счисления / [Стахов А. П., Азаров А. Д., Марценюк В. П. и др.]. – К. : УМК ВО, 1988. – 180 с.

116. Пат. 7408490 В2, США. НКИ 341/120. Calibration of a

redundant number system successive approximation analog-to-digital converter / John L. Melanson, Clinton R. Wolff. № 11/537872; заявл. 02.10.2006; опубл. 05.08.2008;. – 20 с.

117. Пат. 6348885 В1, США. НКИ 341/120. System and method for digitally calibration an analog-to-digital converter / Carlos Estaban Munoz, Karl Ernesto Thompson, Douglas S. Piasecki, Wai Laing Lee, Eric Swanson. № 09/393046; заявл. 09.09.1999; опубл. 19.02.2002. – 10 с.

118. Пат. 6404375 В1, США. НКИ 341/172. System and method of selecting and using bit testing sequences during successive approximation for calibrating an analog to digital converter / Carlos Estaban Munoz, Karl Ernesto Thompson, Douglas S. Piasecki, Wai Laing Lee, Eric Swanson. № 09/393091; заявл. 09.09.1999; опубл. 11.06.2002. – 19 с.

119. Пат. 6417794 В1, США. НКИ 341/161. System and apparatus for digitally calibrating capacitors in an analog-to-digital converter using successive approximation / Carlos Estaban Munoz, Karl Ernesto Thompson, Douglas S. Piasecki, Wai Laing Lee, Eric Swanson. № 09/393826; заявл. 09.09.1999; опубл. 09.07.2002. – 19 с.

120. Пат. 5644308, США. НКИ 341/120. Algorithmic analog-to-digital converter having redundancy and digital calibration // Donald A. Kerth, Brian D. Green. № 372954; заявл. 17.01.1997; опубл. 01.07.1997. – 38 с.

121. 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.

122. 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.

123. 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.

124. 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 інфор-

маційно-енергетичні технології. – 2009. – № 2 (18). – С. 99–109.

125. 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.

126. 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.

127. Гмурман В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятности и математической статистике / Гмурман В. Е. – [Изд. 10-е, стер]. – М. : Высш. шк., 2005. – 404 с.

128. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Вентцель Е. С. – М. : Наука, 1969. – 576 с.

129. Смирнов Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – [Изд. 3-е, стер]. – М. : Наука, 1969. – 512 с.

130. Кадук О. В. Підвищення параметричної надійності АЦП із ваговою надлишковістю / Азаров О.Д., Кадук О.В. // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації : міжнар. конф., 15-17 травня 2007 р. : тези доп. – Вінниця : ВНТУ, – 2007. – С. 140.

131. 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.

132. Комп'ютерна програма для моделювання надійнісних характеристик АЦП порозрядного врівноваження із ваговою надлишковістю / [О. Д. Азаров, О. О. Лукашук, Ю. С. Ліпінська, О. В. Кадук] // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 26842. – К. : Державний департамент інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації : 09.12.2008.

133. 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 депар-

тамент інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації : 15.07.2009.

134. Рего К. Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений / Рего К. Г. – К. : Техніка, 1987. – 128 с.

135. Статистические методы в инженерных исследованиях / [Круг Г. К., Бородюк В. П., Воцинин А. П., Иванов А. З.]; под. ред. Г. К. Круга. – М. : Высш. школа, 1983. – 216 с.

136. Гнатек Ю. Р. Справочник по цифроаналоговым и аналогоцифровым преобразователям / Гнатек Ю. Р. – М. : Радио и связь, 1982. – 552 с.

137. Кадук О. В. Високолінійні 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. № 1 (23). – С. 84–91.

138. Кадук О. В. Перетворювачі форми інформації, що самокалібруються, із ваговою надлишковістю / Азаров О. Д., Кадук О. В., Дудник О. В. // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТГП-2009) : міжнар. конф., 8-10 жовтня 2009 року. : тези доп. – Вінниця : ВНТУ, – 2009. – С. 31.

139. 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.

140. Кадук О. В. Міжкалібрувальний інтервал для АЦП порозрядного кодування із ваговою надлишковістю, що самокалібрується / Азаров О.Д., Кадук О.В. // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації : міжнар. конф., 22-24 квітня 2009 р. : тези доп. – Вінниця : ВНТУ, – 2009. – С. 197–198.

141. Пат. на корисну модель 41315 Україна. МПК (2009) Н03М 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.

142. Пат. на корисну модель 44123 Україна. МПК (2009) Н03М 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.

143. 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.

144. 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. Богомолов, В. А. Гарнага, О. О. Решетнік; заявн. Вінницький національний технічний університет. – № u200703563; заявлено 02.04.2007; опубл. 10.08.2007; Бюл. № 12. – 12 с.

145. 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. Богомолов, Л. В. Крупельницький; заявн. Вінницький національний технічний університет. – № u200613036; заявлено 11.12.2006; опубл. 25.04.2007; Бюл. № 5. – 12 с.

146. Пат. на корисну модель 26413 Україна, МПК (2006) H03K 5/00, G05B 1/00. Двотактний симетричний підсилювач струму / О. Д. Азаров, О. В. Кадук, С. В. Богомолов, В. А. Гарнага, О. О. Решетнік; заявн. Вінницький національний технічний університет. – № u200702063; заявлено 26.02.2007; опубл. 25.09.2007; Бюл. № 15. – 10 с.

Наукове видання

**Азаров Олексій Дмитрович
Кадук Олександр Володимирович**

**БАГАТОРОЗРЯДНІ АЦП І ЦАП
ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ,
СТІЙКІ ДО ПАРАМЕТРИЧНИХ ВІДМОВ**

Монографія

Редактор Н. Мазур

Оригінал-макет підготовлено О. Кадуком

Підписано до друку 22.07.2010 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,63.
Наклад 100 прим. Зам № 2010-121.

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.