

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

БОРТНИК СЕРГІЙ ГЕННАДІЙОВИЧ

УДК 681.335

**ПРИСТРОЇ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ
З КОРИГУВАННЯМ ДИНАМІЧНИХ ПОХИБОК**

Спеціальність 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
КИЧАК Василь Мартинович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри телекомунікаційних систем та
телебачення.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
АЗАРОВ Олексій Дмитрович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри обчислювальної техніки

кандидат технічних наук, доцент
МИЧУДА Леся Зиновіївна,
Національний університет „Львівська політехніка“,
доцент кафедри автоматизації теплових та хімічних
процесів.

Захист відбудеться „18“ травня 2012 р. о 9-³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

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

Автореферат розісланий „13“ квітня 2012 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

С.М. Захарченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) знаходять широке використання у галузі первинних і вторинних перетворень форми інформації. АЦП є обов'язковими компонентами комп'ютерних систем, що обробляють аналогові сигнали. Властивості та характеристики АЦП безпосередньо впливають на ефективність функціонування інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), що орієнтовані на різні предметні галузі, а також комп'ютерних засобів діагностування та контролю процесів і середовищ, пристроїв для вимірювання параметрів випадкових процесів і полів.

Традиційно проблема підвищення точності та роздільної здатності АЦП вирішувалася і частково вирішується як за рахунок застосування досконалішої елементної бази, так і за рахунок уведення надлишковості на різних рівнях проектування систем і компонентів: інформаційному, структурно-схемотехнічному та функціонально-алгоритмічному. Пристрої аналого-цифрового перетворення з коригуванням похибок як новий напрямок техніки перетворення інформації сформувався у 70-х – 80-х роках минулого століття. У його розвиток великий вклад внесли як вітчизняні, так і зарубіжні вчені. У напрямку алгоритмічного та структурного аналізу та синтезу швидкодіючих АЦП слід відзначити роботи наукових шкіл Кондалєва А.І. та Романова В.О. У розробку теорії та нових засобів високопродуктивних перетворювачів інформації на базі надлишкових систем числення значний вклад вніс Азаров О.Д. У теоретичні та експериментальні дослідження мікроелектронних АЦП з табличним коригуванням похибок великий вклад внесли роботи Смолова В.Б. та Кестера У. Значний вклад у побудову швидкодіючих мікросхем АЦП з покращеними динамічними параметрами внесли Багданскіс Е.-А.К. та Марцинкявічус А.-Й.К. Слід відзначити також дослідження Островерхова В.В., які дозволили розкрити механізм виникнення динамічних похибок АЦП.

Незважаючи на ряд вже вирішених питань, при застосуванні АЦП з коригуванням динамічних похибок існує ще багато проблем, які стримують широке використання швидкодіючих АЦП у комп'ютерних системах. А саме: низька роздільна здатність у широкій смузі частот вхідних сигналів, недостатньо розроблені теоретичні аспекти та методи аналого-цифрового перетворення з коригуванням динамічних похибок, що спричиняє обмеження ефективної розрядності АЦП. Ці проблеми пов'язані як з відсутністю необхідної елементної бази, так і зі складністю процесів аналого-цифрового перетворення змінних у часі сигналів, математичний опис яких у часовому та частотному вимірі є досить складним. Таким чином, сучасна схемотехніка не забезпечує реалізації потенційних можливостей швидкодіючих АЦП, що обмежує ефективність використання сучасних комп'ютерних систем оброблення сигналів. Далека до завершення й задача розроблення АЦП, які забезпечують високу роздільну здатність при перетворенні складних сигналів, що характеризуються широким спектром та є шумоподібними. Наслідком цього є невідповідність динамічних параметрів серійно випущених мікросхем АЦП заданим критеріям, що необхідні для виконання умов ефективного функціонування пристроїв аналого-цифрового перетворення у складі комп'ютерних систем.

На основі вищевикладеного актуальною задачею є розвиток теоретичних основ для розробки нових пристроїв аналого-цифрового перетворення з коригуванням динамічних похибок, які дозволяють виконувати перетворення складних сигналів у широкій смузі частот і характеризуються високою роздільною здатністю та відповідністю похибок перетворення задекларованій роздільній здатності АЦП.

Зв'язок з державними програмами, планами, темами науково-дослідних робіт.

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до програм та планів науково-дослідних робіт у Вінницькому національному технічному університеті, а саме:

1. Держбюджетної науково-дослідної роботи „Розробка основ теорії цифрового оброблення високочастотних сигналів в радіотехнічних та телекомунікаційних системах“ (№ державної реєстрації 0105U002415);
2. Держбюджетної науково-дослідної роботи „Розробка основ теорії цифрового оброблення надширокопосмугових сигналів“ (№ державної реєстрації 0108U000658);

3. Госпдоговірної науково-дослідної роботи „Розробка методики проектування цифрової системи передавання“ (№ державної реєстрації 0108U010135). Автор дисертації був виконавцем зазначених НДР.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення роздільної здатності пристроїв аналого-цифрового перетворення шляхом коригування динамічних похибок, що виникають при перетворенні високочастотних сигналів у комп'ютерних системах.

Для досягнення поставленої мети розв'язуються такі задачі:

- аналіз сучасного стану розробок АЦП з коригуванням похибок, аналіз шляхів покращення роздільної здатності пристроїв аналого-цифрового перетворення сигналів;
- розроблення методу підвищення роздільної здатності АЦП, який враховує динамічні властивості перетворюваного сигналу шляхом аналізу його у фазовій площині;
- аналіз динамічних параметрів пристрою аналого-цифрового перетворення з фазо-площинним коригуванням залежно від властивостей вхідного сигналу та значення динамічних похибок АЦП;
- розроблення методу коригування похибок лінійності АЦП при перетворенні високочастотних сигналів, який враховує статистичні властивості вхідних сигналів;
- аналіз статистичних властивостей тестового сигналу пристрою аналого-цифрового перетворення, що використовується для калібрування базового АЦП;
- аналіз граничної роздільної здатності пристрою аналого-цифрового перетворення сигналів, що використовує статистичне коригування похибок лінійності при перетворенні високочастотних сигналів;
- розроблення інженерної методики побудови пристроїв аналого-цифрового перетворення сигналів з коригуванням динамічних похибок, а також розроблення структур та алгоритмів калібрування АЦП з покращеними динамічними параметрами;
- комп'ютерне моделювання запропонованих пристроїв аналого-цифрового перетворення з коригуванням динамічних похибок;
- експериментальні дослідження макетних зразків пристроїв аналого-цифрового перетворення з коригуванням динамічних похибок.

Об'єктом досліджень є процес коригування динамічних похибок результатів аналого-цифрового перетворення сигналів у смузі високих частот.

Предметом досліджень є методи та засоби підвищення роздільної здатності АЦП, що функціонують з широким класом високочастотних вхідних сигналів.

Методи дослідження базуються на використанні: теорії аналого-цифрового перетворення та теорії сигналів для аналізу динамічних похибок у фазовій площині, теорії випадкових процесів для аналізу та синтезу псевдовипадкових тестових сигналів; теорії похибок та теорії цифрового оброблення сигналів для розроблення методів калібрування та дослідження динамічних параметрів АЦП; евристичного синтезу для розробки структур пристроїв аналого-цифрового перетворення з коригуванням динамічних похибок; комп'ютерного моделювання для перевірки отриманих теоретичних положень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому що:

- уперше запропоновано метод коригування динамічних похибок АЦП, який на відміну від відомих передбачає коригування результатів аналого-цифрового перетворення у фазовій площині, при цьому на кожному кроці квантування враховуються не лише інерційні властивості АЦП, але й і швидкість змінювання вхідного сигналу, що дає можливість підвищити роздільну здатність пристроїв аналого-цифрового перетворення;
- уперше запропоновано метод коригування похибок лінійності АЦП при перетворенні високочастотних сигналів, який на відміну від існуючих базується на оцінюванні спотворень функції розподілу вхідного тестового сигналу при калібруванні, що дає можливість повніше оцінити динамічні властивості контрольованого АЦП, а це створює умови для підвищення роздільної здатності АЦП у режимі коригування;
- уперше отримано аналітичні вирази для оцінювання ефективної кількості розрядів та добротності АЦП, що дозволяє виконувати оцінку роздільної здатності АЦП з фазо-площинним коригуванням;

- уперше отримано аналітичні вирази для оцінювання втрати ефективної кількості розрядів від диференціальної нелінійності та нормованої динамічної похибки, які дозволяють визначити ефективність статистичного методу коригування похибок лінійності АЦП при перетворенні високочастотних сигналів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що запропоновані та обґрунтовані в дисертаційній роботі теоретичні положення та наукові результати дозволили:

- розробити інженерну методику побудови пристроїв аналого-цифрового перетворення з коригуванням динамічних похибок, яка дала можливість створювати АЦП з високою роздільною здатністю та спрощеною апаратною реалізацією;

- розробити структуру пристрою аналого-цифрового перетворення з фазо-площинним коригуванням динамічних похибок, в якій застосовуються табличний метод формування сигналу крутості та коригувального члена, а також розробити блок-схему алгоритму фазо-площинного калібрування базового АЦП, при цьому досягається висока роздільна здатність, а за рахунок організації конвеєрної архітектури пристрою зберігається висока швидкодія;

- розробити структуру пристрою аналого-цифрового перетворення зі статистичним коригуванням лінійності, при цьому досягається зниження нелінійності характеристики перетворення АЦП, а використання принципу коригування із заміщенням спрощує структуру за рахунок вилучення зі схеми одного послідовно увімкненого каскаду цифрового підсумовування даних, а також розробити блок-схему алгоритму статистичного калібрування базового АЦП, при цьому використання в схемі вбудованого генератора тестових сигналів спрощує процес калібрування;

- створити діючі макетні зразки пристроїв аналого-цифрового перетворення з використанням базових ВІС АЦП фірми Analog Devices, а саме: 12-розрядного пристрою аналого-цифрового перетворення з фазо-площинним коригуванням динамічних похибок на базі ВІС типу AD872 з ефективною розрядністю 11,25 біт і частотою дискретизації 10 МГц та 10-розрядного пристрою аналого-цифрового перетворення зі статистичним коригуванням нелінійності на базі ВІС типу AD876 з ефективною розрядністю 9,5 біт і частотою дискретизації 20 МГц;

- розробити методики експериментальних випробувань пристроїв аналого-цифрового перетворення, які базуються на дослідженні вихідних сигналів АЦП у часовому і частотному вимірі та дають можливість виконати оцінювання динамічних параметрів АЦП у широкій смузі частот.

Розроблені методи та пристрої впроваджено у Державному науково-дослідному інституті „Гелій“ та ТОВ „Вінницький проектний інститут“. Документи, що підтверджують впровадження результатів дисертаційної роботи, наведені в додатках. У навчальному процесі матеріали дисертаційної роботи використовуються у Вінницькому національному технічному університеті на кафедрі телекомунікаційних систем і телебачення в дисциплінах „Цифрова обробка сигналів“, „Перетворювачі форм інформації“, „Основи схемотехніки“, „Обчислювальна техніка та мікропроцесори“ для напрямку 6.050903 „Телекомунікації“.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати дисертаційної роботи здобувач отримав самостійно. В наукових працях, що опубліковані у співавторстві, йому належать: [1] – математична модель інтегральної нелінійності АЦП; у [2] – режим субдискретизації сигналів в АЦП; [3] – ідея підвищення роздільної здатності АЦП за рахунок триконтурного передбачення сигналів; [4] – принцип коригування похибок лінійності АЦП у динамічному режимі; [5] – фазо-площинний метод коригування динамічних похибок АЦП; [6] – вирази для оцінювання динамічних параметрів АЦП; [7] – математична модель процесу аналого-цифрового перетворення сигналів; [8] – математичні моделі тестових сигналів АЦП; [9] – статистичний метод коригування похибок лінійності АЦП; [10] – вираз для визначення частоти дискретизації АЦП; [11] – ідея оцінювання інтегральної нелінійності у базисі Фур’є; [12] – спектральна модель процесу аналого-цифрового перетворення сигналів; [13] – ідея аналізу похибок АЦП у спектральному вимірі; [14] – ідея удосконалення методу спектрального оцінювання сигналів; [15] – принцип коригування динамічних похибок АЦП у фазовій площині; [16] – структура аналізатора сигналів АЦП; [17] – ідея коригування нелінійності АЦП у базисі Уолша; [18] – ідея табличного методу коригування похибок АЦП;

[19] – структура АЦП на базі методу передбачення сигналів; [20] – ідея представлення сигналів АЦП у базисі Фур'є; [21] – модель процесу аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів; [22] – структура АЦП з коригуванням похибок; [23] – методика визначення динамічних характеристик АЦП; [24] – методика дослідження параметрів АЦП; [26] – структурна схема АЦП; [27] – структурна схема блоку цифрового оброблення сигналу АЦП; [28] – структурна схема АЦП із коригуванням динамічних похибок.

Апробація результатів роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на таких науково-технічних конференціях: Міжнародній науково-технічній конференції „Приладобудування-2004“ (м. Ялта, 2004 р.), I Міжнародній науково-технічній конференції „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування“ (м. Вінниця, 2005 р.), VIII Міжнародній науково-технічній конференції „Контроль і управління в технічних системах“ (м. Вінниця, 2005 р.), Міжнародній науково-технічній конференції „Modern problems of radio engineerings, telecommunications and computer science (TCSET'2006)“ (м. Львів, 2006), XIII Міжнародній науково-технічній конференції з автоматичного управління „Автоматика-2006“ (м. Вінниця, 2006 р.), II Міжнародній науково-технічній конференції „Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування“ (м. Вінниця, 2006 р.), I Міжнародній науково-практичній конференції „Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації“ (м. Вінниця, 2007 р.), III Міжнародній науково-технічній конференції „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування“ (м. Вінниця, 2007 р.), Міжнародній науково-технічній конференції „Modern problems of radio engineerings, telecommunications and computer science (TCSET'2008)“ (м. Львів, 2008), II Міжнародній науково-практичній конференції „Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації“ (м. Вінниця, 2009 р.), IV Міжнародній науково-технічній конференції „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування“ (м. Вінниця, 2009 р.), Міжнародній науково-технічній конференції „Modern problems of radio engineerings, telecommunications and computer science (TCSET'2010)“ (м. Львів, 2010), X Міжнародній науково-технічній конференції „Контроль і управління в складних системах“ (м. Вінниця, 2010 р.), V Міжнародній науково-технічній конференції „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування“ (м. Вінниця, 2011 р.).

Публікації. За підсумками наукових досліджень опубліковано 28 наукових праць, включаючи 9 статей у фахових виданнях, затверджених ВАК України, 16 матеріалів і тез доповідей Міжнародних науково-технічних конференцій та 3 патенти України на корисну модель.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота містить вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг дисертації – 180 сторінок, з яких основний зміст викладено на 144 сторінках, містить 47 рисунків та 1 таблицю. Список використаних джерел складається зі 142 найменувань. Додатки містять результати експериментальних досліджень та документи, що підтверджують впровадження результатів роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дослідження, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Сформульовано мету та задачі дослідження, охарактеризовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено інформацію про впровадження результатів роботи, їх апробацію, публікації та структуру дисертації.

У **першому розділі** здійснено аналіз методів коригування динамічних похибок АЦП. Аналіз динамічних похибок АЦП показав, що динаміка аналого-цифрового перетворення характеризується рядом чинників, перша група яких визначається лише параметрами і методами реалізації АЦП, а друга група визначається як властивостями АЦП, так і властивостями вхідного сигналу. Нормування роздільної здатності лише абсолютними та відносними динамічними похибками не дає повноти та адекватності відображення динамічних властивостей АЦП. Тому необхідно нормувати роздільну здатність АЦП також

узагальненими динамічними параметрами такими, як ефективна кількість розрядів та добротність АЦП, які враховують особливості аналого-цифрового перетворення широкого класу високочастотних сигналів.

Дослідження показали, що найефективнішими методами підвищення роздільної здатності АЦП є структурні методи, які базуються на методології коригування результатів аналого-цифрового перетворення широкого класу вхідних впливів, а саме широкосмугових, псевдовипадкових сигналів, що адекватно відображають функціонування пристроїв аналого-цифрового перетворення у складі сучасних комп'ютерних систем.

Показано, що для підвищення роздільної здатності АЦП необхідно враховувати динамічні похибки першого та другого роду при аналого-цифровому перетворенні. При цьому представляється достатньо обґрунтованим загальний підхід до коригування динамічних похибок, що базується на використанні принципу табличного коригування результатів аналого-цифрового перетворення. Одним з можливих методів підвищення роздільної здатності є коригування похибок лінійності АЦП при перетворенні високочастотних сигналів. Здійснити таке коригування можна шляхом використання статистичної методології оцінювання характеристик сигналів.

У **другому розділі** запропоновано новий метод коригування динамічних похибок АЦП у фазовій площині. При цьому необхідно попередньо визначити похибку $\Delta_d(i \cdot T_s)$ для кожного i -го квантованого значення вихідного сигналу АЦП. Встановлено, що значення динамічної похибки на кожному кроці квантування залежить не лише від інерційних властивостей АЦП, але й і від швидкості змінювання вхідного сигналу на вході перетворювача. Тому при визначенні динамічної похибки $\Delta_d(i \cdot T_s)$ доцільно враховувати вихідний код АЦП $y(i \cdot T_s)$ та крутість сигналу $y'(i \cdot T_s)$. Узагальнена структура процесу коригування на базі фазової площини представлена на рис. 1.

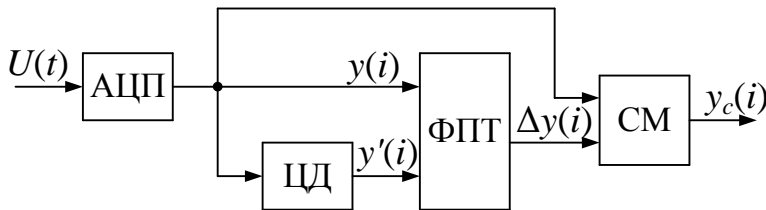


Рисунок 1 – Узагальнена структура процесу фазо-площинного коригування динамічних похибок АЦП

Встановлено, що при дослідженні динамічних властивостей АЦП у першу чергу повинна бути вирішена проблема вибору тестових сигналів. Для обчислення значень

$$\Delta y[y(i \cdot T_s), y'(i \cdot T_s)]$$

необхідно вибрати такий

тестовий сигнал АЦП, який би дав змогу виконати калібрування усіх квантованих рівнів АЦП та виконати дослідження адекватності отриманих оцінок динамічної похибки АЦП. Доведено, що оптимальним тестовим сигналом, який створює умови для виявлення нелінійності АЦП, що спричиняє гармонічні та комбінаційні спотворення сигналу є бігармонічний або двотональний сигнал, спектр якого містить дві гармонічні складові з частотами ω_1 та ω_2 й амплітудами U_{m1} і U_{m2} . Врахувавши, що $U_{m1} = U_{m2} = U_{ADC}$ та $\omega_2 - \omega_1 = \Delta\omega$, вираз для тестового сигналу АЦП набуде вигляду

$$U_T(t) = U_{ADC} \cos(\Delta\omega \cdot t) \cdot \cos[(\omega_1 + 0,5\Delta\omega) \cdot t]. \quad (1)$$

Виконано аналіз особливостей тестового сигналу АЦП у фазовій площині. Встановлено, що фазова траєкторія вхідного сигналу АЦП на фазовій площині знаходиться в межах

$$-U_{ADC} < U_{ADC} \cos(\Delta\omega \cdot t) \cdot \cos[(\omega_1 + 0,5\Delta\omega) \cdot t] < U_{ADC},$$

(2)

$$-S < -U_{ADC}(\omega_1 + 0,5\Delta\omega) \cdot \cos(\Delta\omega) \cdot \sin[(\omega_1 + 0,5\Delta\omega) \cdot t] < S.$$

На етапі калібрування необхідно виявити динамічні похибки АЦП на всій множині можливих значень вхідного сигналу як за амплітудою, так і за крутістю. За результатами вимірювань у контрольних точках кривої на фазовій площині важко оцінювати динамічні похибки АЦП для точок, що знаходяться за межами даної кривої. Змінюючи амплітуду і частоти двотонального сигналу (U , dU/dt) неможливо отримати сукупність рівня та крутості сигналу, яка відповідає зонам фазової площини, що прилягають до вершин прямокутника. Слід відзначити, що ці зони мають бути обов'язково покриті контрольними точками, тому що в них АЦП має максимальні значення похибок. Для наближення режиму випробування АЦП до умов функціонування з реальними вхідними сигналами запропоновано додати у тестовий сигнал ще один ступінь свободи, а саме постійне зміщення U_0 . Тобто, тестовий сигнал можна представити як суму постійного та бігармонічного сигналу

$$U_T(t) = U_0 + U_{ADC} \cdot \cos[(\omega_1 + 0,5\Delta\omega)t] \cdot \cos(\Delta\omega \cdot t). \quad (3)$$

Змінюючи U_0 , U_{ADC} , ω_1 та ω_2 неважко забезпечити отримання будь-яких комбінацій U та dU/dt у моменти запуску досліджуваного АЦП. При цьому зона існування вхідних тестових сигналів, що задана на фазовій площині, може бути охоплена будь-якою сіткою перевірних точок (рис. 2). Дана методика відноситься до класу диференціальних, тому вона характеризується високою чутливістю до динамічних спотворень і не потребує високої точності рівня зміщення U_0 та амплітуди бігармонічного сигналу U_{ADC} .

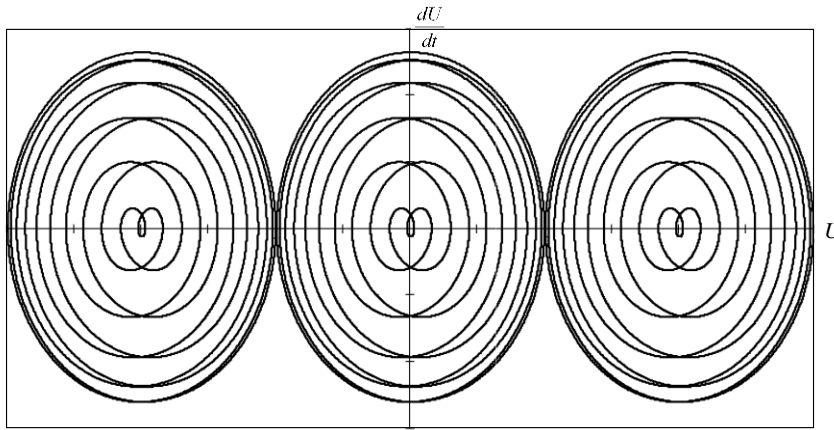


Рисунок 2 – Траєкторії тестового сигналу АЦП у фазовій площині

Ключовим етапом процесу калібрування та коригування АЦП у фазовій площині є визначення швидкості зміни його вихідного сигналу $V_{y_{ADC}}(i) = \frac{\Delta y(i)}{\Delta t}$. Враховуючи, що

період дискретизації $T_S = \frac{1}{F_S}$, крутість вихідного сигналу АЦП для i -го відліку дорівнює

$$V_{y_{ADC}}(i) = [y(i) - y(i-1)] \cdot F_S. \quad (4)$$

Для знаходження крутості згідно (4) необхідно виконати операцію множення, яка відноситься до класу „довгих“ операцій, що у разі її безпосереднього виконання призведе до різкого зниження швидкодії пристроїв аналого-цифрового перетворення з фазо-площинним коригуванням. З метою підвищення продуктивності процесу визначення крутості сигналу запропоновано застосувати метод табличної реалізації функції $V(a, b)$ двох змінних, де $a = y$, $b = F_S$.

Виконано аналіз динамічних параметрів АЦП при фазо-площинному коригуванні результатів аналого-цифрового перетворення. Запропоновано вираз для оцінювання ефективної кількості розрядів АЦП з коригуванням у фазо-площинній зоні з урахуванням m -розрядних коригувальних членів:

$$n_{efc} = n - 0,5 \log_2 \left(1 + 3 \frac{(\delta_D - \Delta y)^2}{h^2} + a_\tau^2 \cdot 2^{-m} \right). \quad (5)$$

На рис. 3 представлено залежність ефективної розрядності 12-розрядного пристрою аналого-цифрового перетворення від значення нормованої динамічної похибки для різних рівнів коригування.

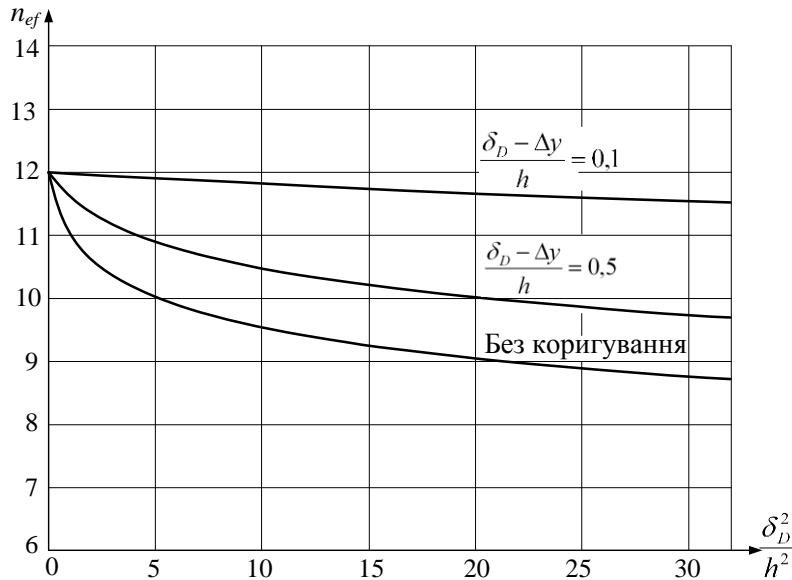


Рисунок 3 – Залежність ефективної кількості розрядів коригувальних членів від значення нормованої динамічної похибки

У режимі функціонування без коригування роздільна здатність АЦП знижується на 3,2 біти. У разі коригування результатів аналого-цифрового перетворення відбувається покращення параметрів на 2,5 ÷ 2,7 біти залежно від заданого рівня введення поправок у вихідний сигнал АЦП. Результати аналізу, що наведені вище не враховують особливості класу вхідних сигналів, що підлягають аналого-цифровому перетворенню.

На базі теорії інформації та результатів оптимального коригування отримано граничні значення середньоквадратичної похибки АЦП для заданого класу вхідних сигналів. При цьому ефективна кількість розрядів дорівнює:

$$n_{efc} = n - 0,5 \log_2 \left(1 + 10^{\frac{U_{in}}{10}} + 2^{-m} \right). \quad (6)$$

У виразі (6) для ефективної розрядності АЦП з коригуванням відсутня складова динамічної похибки у явному вигляді, хоча вона непрямим чином впливає через рівень вхідного сигналу. Цей вираз дає змогу побудувати графіки залежностей ефективної кількості розрядів базового АЦП та пристрою аналого-цифрового перетворення з коригуванням від значення вхідного сигналу (рис. 4). З рисунку видно, що в діапазоні зміни рівня вхідного сигналу базового АЦП – 20 ÷ – 10 дБ ефективна кількість розрядів знижується незначно. Основне зменшення ефективної розрядності АЦП спостерігається у діапазоні – 20 ÷ 0 дБ, що пояснюється умовами „охоплення“ всієї шкали аналого-цифрового перетворення при високих значеннях вхідного сигналу. При цьому, базовий АЦП без коригування демонструє зниження роздільної здатності на 2,4 біти порівняно з коригувальним режимом у всьому діапазоні зміни вхідного сигналу.

Запропоновано узагальнений критерій якості АЦП, що визначає його ефективність у динамічному режимі, представляти добротністю АЦП

$$Q = f_s \cdot 2^{0,5 \cdot n} \cdot F(\delta). \quad (7)$$

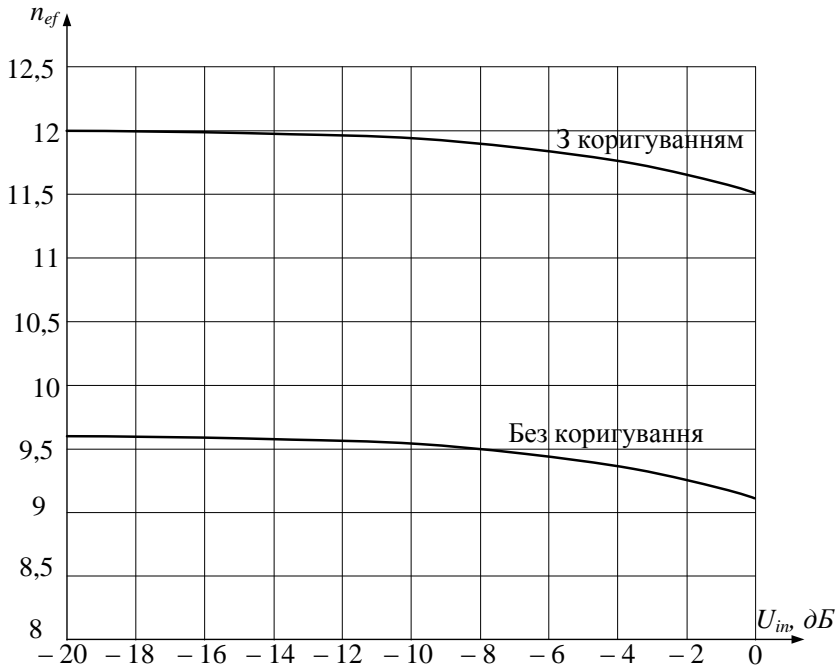


Рисунок 4 – Залежність ефективної кількості розрядів пристрою аналого-цифрового перетворення від рівня вхідного сигналу

рівні 10^{10} для різних рівнів динамічної похибки. Ефективна кількість розрядів АЦП з коригуванням змінюється у межах 2 біт, у той же час ефективна розрядність базового АЦП без коригування знижується у найгіршому випадку для великих значень динамічної похибки удвічі.

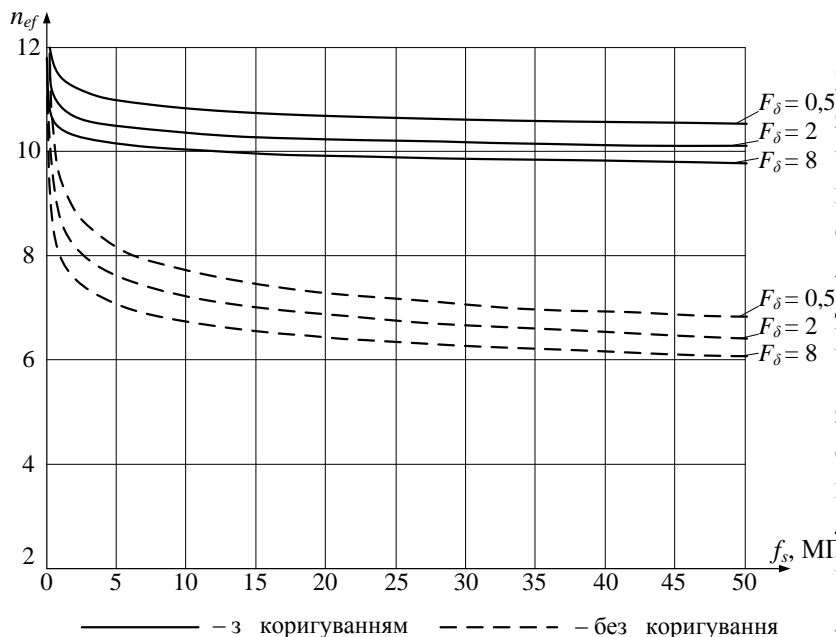


Рисунок 5 – Залежність прогнозованої ефективної кількості розрядів пристрою аналого-цифрового перетворення від частоти дискретизації

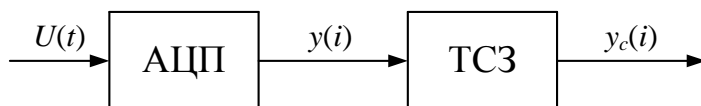


Рисунок 6 – Узагальнена структура процесу

Виконано побудову графіків залежності прогнозованої ефективної кількості розрядів пристрою аналого-цифрового перетворення, що реалізує метод фазо-площинного коригування, від частоти дискретизації (рис. 5). Графіки побудовано для режиму функціонування АЦП із коригуванням та без коригування динамічних похибок, при цьому добротність пристрою з коригуванням задано на

Зменшення роздільної здатності АЦП зі збільшенням частоти дискретизації пояснюється розширенням смуги частот вхідного сигналу, яка пов'язана з частотою дискретизації умовами теореми Котельникова.

У третьому розділі запропоновано новий статистичний метод коригування похибок лінійності АЦП при перетворенні ВЧ-сигналів.

Для даного методу узагальнена структура процесу коригування вихідного коду АЦП представлена на рис. 6.

Для даного методу вихідний код АЦП, що підлягає коригуванню є адресою скоригованого значення АЦП. Тобто, відбувається заміщення коду $y(i)$ скоригованим кодом $y_n(i)$.

Якщо АЦП характеризується похибкою $\Delta y(i)$, то в таблиці скоригованих значень (ТСЗ) записується значення $y_c(i)$. Таким чином, коригування здійснюється шляхом зіставлення вихідної вибірки АЦП $y(i)$ з відповідною адресою таблиці $A(i)$. Така структура коригування має одну ланку оброблення вихідного сигналу АЦП, що дає можливість покращувати характеристики швидкодієвих АЦП.

Визначення похибок лінійності АЦП запропоновано здійснювати шляхом оцінювання спотворень функції розподілу тестового сигналу. Для статистичного методу необхідно обчислити густину ймовірності миттєвих значень тестового сигналу $\omega(U)$. Диференціальна нелінійність для кроку квантування h дорівнює

$$\Delta_{dn}^{(3)} = h - (U_{i+1} - U_i) = h - \frac{p(i)}{\omega(U_i + \varepsilon)}. \quad (8)$$

На базі визначеної ймовірності появи вихідного коду $p(i < j) = \int_0^{U_j} \omega(U) dU$ можна знайти похибку лінійності АЦП:

$$\Delta_n(j) = \frac{1}{\omega(U_j + \varepsilon)} [p_0(i < j) - p(i < j)]. \quad (9)$$

Аналіз нелінійності ХП АЦП на базі експериментальних результатів аналого-цифрового перетворення здійснюється після попереднього калібрування АЦП, тобто, врахування значення кроку квантування h і зміщення нуля Δ_0 . Пошук значень h_r і Δ_{r0} здійснюється на базі критерію мінімуму середньої квадратичної похибки. У рамках запропонованого статистичного методу коригування доведено, що для оцінювання похибок лінійності АЦП необхідно мати повний опис властивостей тестового сигналу та значення динамічних параметрів контрольованого перетворювача. Похибки лінійності АЦП потрібно визначати при тестуванні перетворювача сигналом, що є близьким за типом та характеристиками до реальних сигналів, для яких призначено АЦП.

Для багатотонального сигналу, що містить l гармонічних коливань з однаковими амплітудами $\frac{U_m}{l}$ та випадковими взаємозалежними фазами, характеристична функція

знаходиться як $\theta_l(V) = \left[J_0\left(\frac{V}{\sqrt{l}}\right) \right]^l$. Густина ймовірності багатотонального сигналу дорівнює

$$\omega_l(U) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \left[J_0\left(\frac{V}{\sqrt{l}}\right) \right]^l \cdot \cos(VU) \cdot dV. \quad (10)$$

Знаходження визначеного інтегралу (10) для $l \geq 2$ здійснюється з використанням функцій Лежандра другого роду $Q_V(U)$. На рис. 7 представлено розподіл густин ймовірностей багатотональних тестових сигналів з різним числом l .

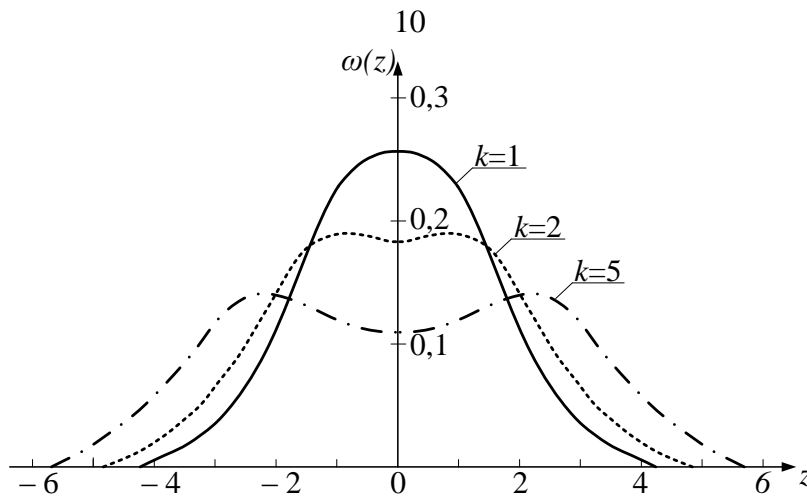


Рисунок 7 – Густина ймовірностей двотонального (1), тритонального (2) та чотиритонального сигналу (3)

Отриманні результати дають можливість стверджувати, що вже густина ймовірності чотиритонального сигналу, який містить чотири синусоїдальних складових з випадковими фазами відображає криву подібну до гауссового процесу, незважаючи на те, що окремі синусоїди характеризуються зовсім іншою густиною ймовірності. Цей сигнал є найоптимальнішим типом тестового сигналу АЦП, який, з одного боку, дає змогу забезпечити режими функціонування АЦП, що адекватні реальним, а з іншого – просто реалізується при використанні широкої номенклатури стандартних генераторів сигналів із нормованими метрологічними характеристиками.

Запропоновано вирази для оцінювання ефективності статистичного методу коригування похибок лінійності при перетворенні високочастотних сигналів. Параметр, який характеризує різницю між відношенням сигнал/шум ідеального АЦП та відношенням сигнал/шум АЦП з оптимально скоригованими похибками лінійності знаходиться як

$$\Delta S/N = 10 \lg \left(1 + \frac{3\sigma_B^2}{h^2} \right). \quad (11)$$

Різниця між ефективним числом розрядів ідеального АЦП та ефективним числом розрядів оптимально скоригованого АЦП дорівнює

$$\Delta n_{ef} = n_{ef_{id}} - n_{ef_c} = 0,5 \cdot \log_2 \left(1 + \frac{3\sigma_B^2}{h^2} \right). \quad (12)$$

На рис. 8 представлено криві залежності $\Delta S/N$ і Δn_{ef} від співвідношення $\frac{\sigma_B^2}{h^2}$.

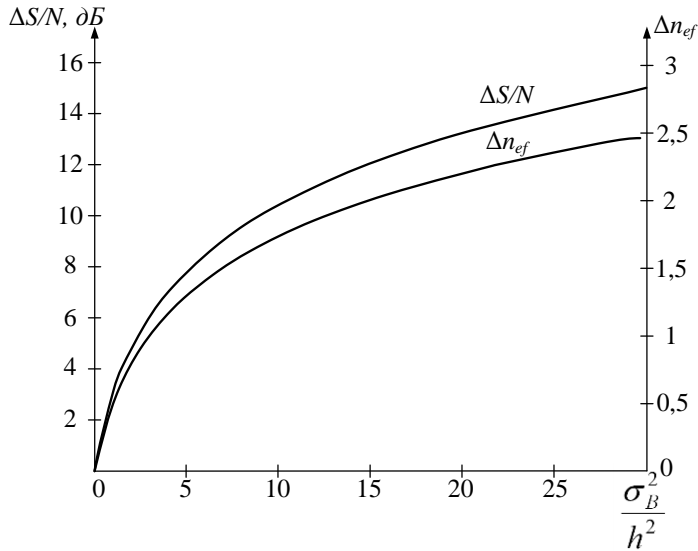


Рисунок 8 – Залежність втрати відношення сигнал/шум і ефективної розрядності

Аналіз графіків дозволяє зробити висновок, що отримання максимальної ефективності коригування АЦП на базі статистичного методу можливе у діапазоні великих значень дисперсії диференціальної нелінійності базового АЦП (1...10 ОМР).

На рис. 9 представлено графіки залежностей втрати ефективної розрядності від диференціальної нелінійності реального АЦП та АЦП з коригуванням для різних $\frac{\sigma_B^2}{h^2}$. Із

графіка видно, що втрати ефективної розрядності при статистичному коригуванні не залежать від значення диференціальної нелінійності, а визначаються лише відношенням $\frac{\sigma_B^2}{h^2}$.

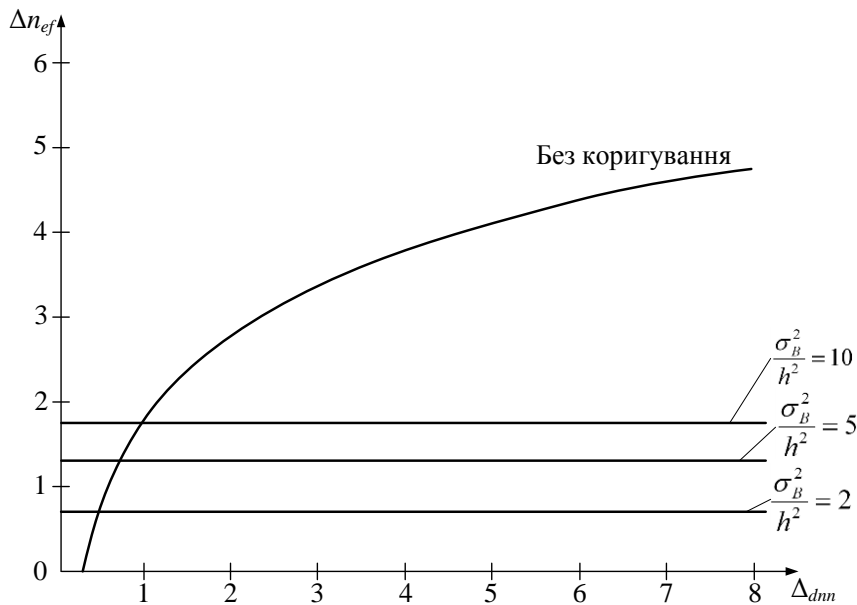


Рисунок 9 – Залежності втрати ефективної розрядності від диференціальної нелінійності АЦП

При цьому залежно від $\frac{\sigma_B^2}{h^2}$ у діапазоні значень диференціальної нелінійності 2÷8 ОМР при статистичному коригуванні спостерігається вигрощ в ефективній кількості розрядів від 1,5 до 4,5 біт порівняно з базовим аналого-цифровим перетворенням без коригування.

У **четвертому розділі** розглянуто інженерну методику побудови пристроїв аналого-цифрового перетворення з коригуванням динамічних похибок, при цьому сформовано систему параметрів, які є початковими умовами при побудові, а саме: частота дискретизація, смуга частот вхідних сигналів, ефективна кількість розрядів, крок квантування. Наведено основні вирази, що застосовуються при розробленні схем пристроїв аналого-цифрового перетворення.

Виконано розробку структури пристрою аналого-цифрового перетворення з фазоплощинним коригуванням динамічних похибок, в якій застосовуються табличний метод формування сигналу крутості та коригувального члена (рис. 10).

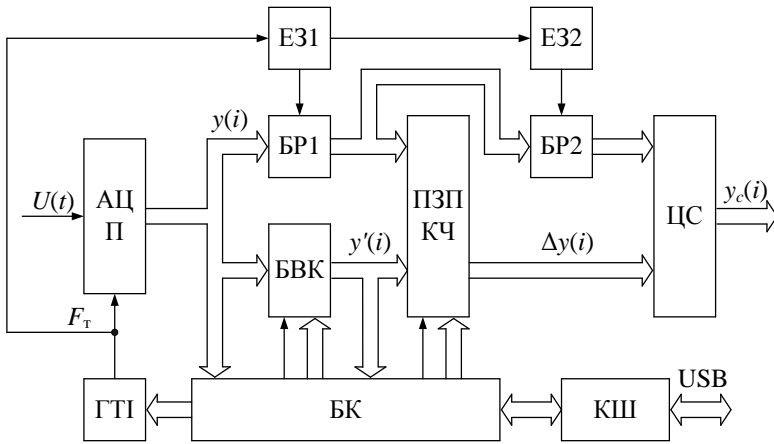


Рисунок 10 – Структура пристрою аналого-цифрового перетворення з фазо-площинним коригуванням динамічних похибок

Розроблено блок-схему алгоритму фазо-площинного калібрування базового АЦП.

За рахунок організації конвеєрної структури пристрою аналого-цифрового перетворення зберігається висока швидкодія АЦП.

Здійснено розробку структури пристрою аналого-цифрового перетворення зі статистичним коригуванням лінійності, в якій реалізується принцип коригування із

заміщенням, що спрощує структуру за рахунок вилучення із схеми одного послідовно ввімкненого каскаду цифрового підсумовування даних (рис. 11).

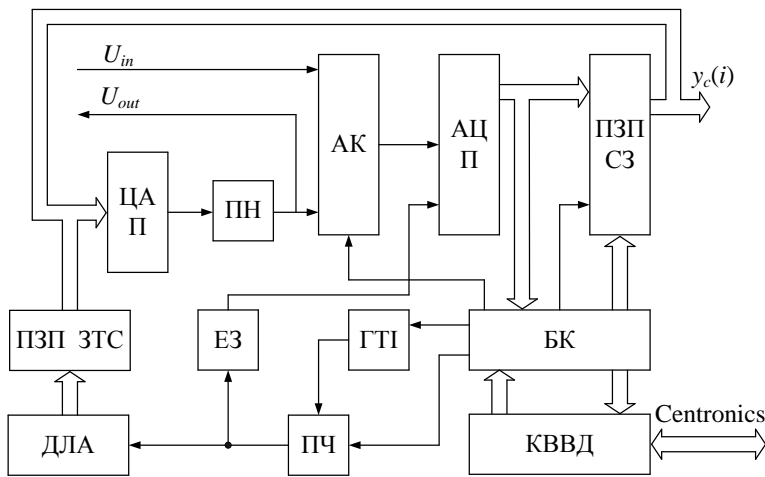


Рисунок 11 – Структура пристрою аналого-цифрового перетворення зі статистичним коригуванням

Розроблено блок-схему алгоритму статистичного калібрування базового АЦП. Використання в схемі вбудованого генератора тестових сигналів спрощує процес калібрування. Проведене комп'ютерне моделювання на рівні принципів електричних схем пристроїв аналого-цифрового перетворення з коригуванням підтвердило

теоретичні положення та аналітичні висновки,

отримані у II і III розділах роботи. Завищені значення динамічних параметрів АЦП, отримані в результаті комп'ютерного моделювання можна пояснити неможливістю врахування в моделі АЦП повного комплексу усіх складових динамічних похибок перетворення конкретного типу ВІС АЦП.

Здійснено розробку макетних зразків пристроїв аналого-цифрового перетворення з використанням базових ВІС АЦП фірми Analog Devices, а саме 12-розрядного пристрою аналого-цифрового перетворення з фазо-площинним коригуванням динамічних похибок з частотою дискретизації 10 МГц на базі ВІС типу AD872 та 10-розрядного пристрою аналого-цифрового перетворення зі статистичним коригуванням нелінійності з частотою дискретизації 20 МГц на базі ВІС типу AD876. Експериментальні дослідження макетів згідно розробленої методики випробування довели, що фазо-площинне коригування динамічних похибок дозволяє підвищити роздільну здатність АЦП з 8,5 до 11,25 ефективних розрядів. Випробування макету пристрою аналого-цифрового перетворення з коригуванням нелінійності довели, що статистичне коригування дозволяє знизити нелінійність ХП АЦП на 2,5 OMP навіть на граничних частотах перетворення.

Незначна розбіжність результатів комп'ютерного моделювання та експериментальних випробувань у смузі високих частот виникає внаслідок впливу інерційності реальних елементів схем та наявності ряду конструктивно-технологічних обмежень, які важко врахувати при імітаційному моделюванні.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі виконано дослідження, які присвячено підвищенню роздільної здатності пристроїв аналого-цифрового перетворення шляхом коригування динамічних похибок, що виникають при перетворенні широкого класу сигналів у комп'ютерних системах.

Основні результати досліджень такі:

1. Виконано аналіз принципів підвищення роздільної здатності пристроїв аналого-цифрового перетворення сигналів. Зроблено висновок, що на сучасному етапі розвитку теорії та техніки перетворення форми інформації актуальним і перспективним є створення нових методів і засобів підвищення роздільної здатності аналого-цифрового перетворення широкого класу вхідних сигналів, а саме широкосмугових і псевдовипадкових, що адекватно відображають умови функціонування пристроїв аналого-цифрового перетворення у складі сучасних комп'ютерних систем.

2. Запропоновано новий метод коригування динамічних похибок АЦП, який на відміну від відомих передбачає коригування результатів аналого-цифрового перетворення у фазовій площині, при цьому на кожному кроці квантування враховуються не лише інерційні властивості АЦП, але й і швидкість змінювання вхідного сигналу, що дає можливість підвищити роздільну здатність пристроїв аналого-цифрового перетворення. Вперше запропоновано як тестовий для калібрування АЦП двотональний сигнал зі зміщенням, який на відміну від однотональних сигналів, дає можливість усунути вплив статичних похибок АЦП на оцінки динамічних похибок, а також підвищити адекватність процесу калібрування базового АЦП, результати якого можна поширювати на широкий клас вхідних сигналів пристрою аналого-цифрового перетворення. Водночас двочастотні тестові впливи неважко реалізувати за допомогою існуючих атестованих генераторів синусоїдальних сигналів чи синтезаторів частот.

3. Уперше отримано аналітичні вирази для оцінювання ефективної кількості розрядів АЦП, що дозволило виконати оцінку роздільної здатності АЦП з фазо-площинним коригуванням. Показано, що фазо-площинне коригування дозволяє підвищити ефективну кількість розрядів на $2,0 \div 2,5$ біти залежно від рівня вхідного сигналу та значення динамічної похибки, чим досягається підвищення роздільної здатності пристроїв аналого-цифрового перетворення. Проведений аналіз ефективної розрядності та добротності АЦП з коригуванням динамічних похибок підтвердив ефективність методу фазо-площинного коригування динамічних похибок АЦП.

4. Запропоновано новий метод коригування похибок лінійності АЦП при перетворенні високочастотних сигналів, який на відміну від існуючих базується на оцінюванні спотворень функції розподілу вхідного тестового сигналу при калібруванні, що дає можливість повніше оцінити динамічні властивості контрольованого АЦП, а це створює умови для підвищення роздільної здатності АЦП у режимі коригування.

5. Уперше запропоновано чотиритональний сигнал як найоптимальніший тип тестового впливу, що використовується при статистичному коригуванні похибок лінійності АЦП. Аналіз статистичних властивостей цього тестового сигналу довів, що він дає змогу забезпечити реальні режими функціонування АЦП та просто реалізується при використанні широкої номенклатури стандартних генераторів сигналів.

6. Проведено аналіз граничної роздільної здатності запропонованого статистичного методу коригування похибок лінійності. Отримані аналітичні вирази залежності втрати ефективної кількості розрядів від диференціальної нелінійності та нормованої динамічної похибки підтверджують, що статистичний метод коригування похибок лінійності АЦП дає змогу підвищити ефективну кількість розрядів на $1,5 \div 4,5$ біти залежно від ступеня спотворення характеристики перетворення базового АЦП.

7. Запропоновано інженерну методику побудови пристроїв аналого-цифрового перетворення з коригуванням динамічних похибок, на базі якої розроблено структури пристроїв аналого-цифрового перетворення та алгоритми калібрування базових АЦП. Показано, що запропонована методика дає можливість знизити кількість ВІС у пристроях

аналого-цифрового перетворення, тому що більшість вузлів АЦП використовуються як на етапі калібрування, так і в основному робочому режимі.

8. Виконано комп'ютерне моделювання на рівні принципів електричних схем та експериментальні дослідження діючих макетних зразків 10-розрядних та 12-розрядних пристроїв аналого-цифрового перетворення з частотами дискретизації відповідно 20 МГц і 10 МГц. Виконані експериментальні дослідження підтвердили основні теоретичні положення роботи. Порівнянням результатів розрахунків динамічних параметрів розроблених АЦП з експериментальними даними, отриманими на різних макетах і при комп'ютерному моделюванні, підтверджено достовірність запропонованих у дисертаційній роботі методів й аналітичних виразів. Запропоновані схемотехнічні рішення захищені патентами України.

9. Отримані результати роботи впроваджено у Державному науково-дослідному інституті „Гелій“ і ТОВ „Вінницький проектний інститут“, а також використовуються у навчальному процесі Вінницького національного технічного університету на кафедрі телекомунікаційних систем і телебачення.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бортник С.Г. Дослідження інтегральної нелінійності аналого-цифрового перетворювача у базисі дискретних функцій Фур'є / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – №5. – С. 117–120. – ISSN 1997-9266.

2. Бортник С.Г. Дискретизація вузькосмугових сигналів / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник, О.В. Стальченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2005. – №2. – С. 45–48. – ISSN 2219-9365.

3. Бортник С.Г. Аналого-цифровий перетворювач на базі диференціальної імпульсно-кової модуляції / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник, В.А. Челоян // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2006. – №2. – С. 57–61. – ISSN 2219-9365.

4. Бортник С.Г. Аналого-цифровий перетворювач з коригуванням диференціальної нелінійності на основі гістограмного методу оцінювання параметрів / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник, В.А. Челоян // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – Т.2, №2. – С. 140–142. – ISSN 2226-9150.

5. Бортник С.Г. Аналого-цифровий перетворювач з коригуванням похибок на основі фазо-площинної матриці / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник, О.В. Стальченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2007. – №2. – С. 14–21. – ISSN 1999-9941.

6. Бортник С.Г. Цифровий кодер телевізійних сигналів на базі диференціальної імпульсно-кової модуляції / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник, В.А. Челоян // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2007. – №2. – С. 35–40. – ISSN 1681-7893.

7. Бортник С.Г. Метод ідентифікації моделі аналого-цифрового перетворювача / С.Г. Бортник, Н.О. Пунченко, О.В. Стальченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – №1. – С. 88–91. – ISSN 1997-9266.

8. Бортник С.Г. Дослідження тестових сигналів для контролю характеристик аналого-цифрових перетворювачів / В.М. Кичак, С.Г. Бортник, Н.О. Пунченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – №1. – С. 80–84. – ISSN 2219-9365.

9. Бортник С.Г. Статистичний метод коригування нелінійності аналого-цифрових перетворювачів у динамічному режимі / С.Г. Бортник, В.М. Кичак, Н.О. Пунченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – №2. – С. 90–93. – ISSN 2219-9365.

10. Бортник С.Г. Аналого-цифрове перетворення сигналів з надмірною дискретизацією / В.М. Кичак, С.Г. Бортник // Приладобудування-2004: збірник праць міжнародної науково-технічної конф., м. Ялта, 2004 р. – Вінниця-Ялта, 2004. – С. 96–100.

11. Бортник С.Г. Дослідження інтегральної нелінійності аналого-цифрового перетворювача за допомогою дискретного перетворення Фур'є / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2005):

матеріали першої Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 2-5 червня 2005 р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – С. 45–46. – ISBN 966-641-130-X.

12. Бортник С.Г. Спектральний метод ідентифікації моделі аналого-цифрового перетворювача / Бортник Г.Г., Бортник С.Г. // Контроль і управління в технічних системах (КУСС-2005): тези доповідей восьмої Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 24 – 27 жовтня 2005 р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – С. 121.

13. Bortnik S. The mathematical model of the analog-digital converter / Kichak V., Bortnik G., Bortnik S. // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science (TCSET'2006): proceedings of the Int. Conf., Lviv-Slavsko, Ukraine, February 28 – March 4, 2006. – Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2006. – P. 564–565. – ISBN 966-553-507-2.

14. Бортник С.Г. Оптимізація методу спектрального оцінювання сигналів на коротких інтервалах часу / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник, О.В. Стальченко // XIII Міжнар. конф. з автоматичного управління (Автоматика-2006): тези доповідей тринадцятої Міжнар. науково-технічної конф., м. Вінниця, 25-28 вересня 2006 р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – С. 27. – ISBN 966-641-187-3.

15. Бортник С. Аналого-цифровий перетворювач з коригуванням похибок на основі фазо-площинної матриці / Бортник Г., Бортник С., Стальченко О. // Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПМРТП-2006): матеріали другої Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 16-19 лист. 2006 р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – С. 53–54. – ISBN 966-641-195-4.

16. Бортник С. Цифровий панорамний аналізатор спектра / Бортник Г., Бортник С., Костецький В. // Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПМРТП-2006): матеріали другої Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 16-19 лист. 2006 р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – С. 55–56. – ISBN 966-641-195-4.

17. Бортник С.Г. Аналого-цифровий перетворювач з коригуванням нелінійності у базисі Уолша / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник., В.М. Кичак // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації: тези доповідей першої Міжнар. науково-практичної конф., Вінниця, 15-17 травня 2007 р. – Вінниця: ВНТУ, 2007. – С. 119–120.

18. Бортник С. Табличний метод коригування похибок аналого-цифрових перетворювачів / Г. Бортник, С. Бортник, В. Кичак // Сучасні проблеми, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2007): матеріали третьої Міжнар. науково-технічної конф., м. Вінниця, 31 травня – 2 червня 2007 р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – С. 84–85. – ISBN 978-966-641-220-4.

19. Бортник С. Аналого-цифровий перетворювач телевізійних сигналів на основі диференціальної імпульсно-кодової модуляції / Г. Бортник, С. Бортник, В. Челоян // Сучасні проблеми, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2007): матеріали третьої Міжнар. науково-технічної конф., м. Вінниця, 31 травня – 2 червня 2007 р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – С. 86–87. – ISBN 978-966-641-220-4.

20. Bortnyk S. Processing of signals by wavelet and Fourier transformations / V. Kychak, O. Stalchenko, S. Bortnyk // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science (TCSET'2008): proceedings of the Int. Conf., Lviv-Slavsko, Ukraine, February 19-23, 2008. – Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2008. – P. 479–480. – ISBN 978-966-553-678-9.

21. Бортник С.Г. Динамічна модель аналого-цифрового перетворювача / В.М. Кичак, С.Г. Бортник., Н.О. Пунченко // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації: тези доповідей другої Міжнар. науково-практичної конф., Вінниця, 22-24 квітня 2009 р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – С. 180–181. – ISBN 978-966-641-304-1.

22. Бортник С. Аналого-цифровий перетворювач з коригуванням динамічних похибок / В. Кичак, С. Бортник // Сучасні проблеми, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2009): матеріали IV Міжнар. науково-технічної конф., м. Вінниця, 8-10 жовтня 2009 р., Частина 1. – Вінниця, 2009. – С. 45.

23. Bortnyk S. High-efficient method of determination of a dynamic characteristic of the analog-to-digital converter / V. Kychak, S. Bortnyk, N. Punchenko // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science (TCSET'2010): proceedings of the Xth Int. Conf., Lviv-Slavsko, Ukraine, February 27-27, 2010. – Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2010. – P. 65. – ISBN 978-966-553-875-2.

24. Бортник С.Г. Оптимізація систем з цифровим обробленням сигналів / В.М. Кичак, С.Г. Бортник, Н.О. Пунченко // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010): тези доповідей десятої Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 19-21 жовтня 2010 р. – Вінниця, 2010. – С. 155.

25. Бортник С. Швидкодійний аналого-цифровий перетворювач з покращеними динамічними параметрами / С. Бортник // Сучасні проблеми, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2011): матеріали V Міжнар. науково-технічної конф., м. Вінниця, 19-21 травня 2011 р. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – С. 9–10. – ISBN 978-966-641-411-6.

26. Пат. на корисну модель 11757 Україна, МПК H03M 1/12. Паралельний аналого-цифровий перетворювач / Бортник Г.Г., Бортник С.Г., Стальченко О.В.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200505399; заявл. 06.06.2005; опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1. – 8 с.

27. Пат. на корисну модель 12879 Україна, МПК H03M 1/36. Аналого-цифровий перетворювач / Бортник Г.Г., Бортник С.Г., Стальченко О.В.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200505418; заявл. 06.06.2005; опубл. 15.03.2006, Бюл. № 3. – 10 с.

28. Пат. на корисну модель 35500 Україна, МПК H03M 1/12. Пристрій для аналого-цифрового перетворення / Бортник Г.Г., Бортник С.Г., Стальченко О.В.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200804101; заявл. 01.04.2008; опубл. 25.09.2008, Бюл. № 18. – 6 с.

АНОТАЦІЯ

Бортник С.Г. Пристрої аналого-цифрового перетворення з коригуванням динамічних похибок. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця – 2012.

Дисертацію присвячено розробці методів підвищення роздільної здатності пристроїв аналого-цифрового перетворення за рахунок коригування динамічних похибок, що виникають при перетворенні широкого класу сигналів у комп'ютерних системах. Запропоновано новий метод коригування динамічних похибок АЦП, який на відміну від відомих передбачає коригування результатів аналого-цифрового перетворення у фазовій площині, при цьому на кожному кроці квантування враховуються не лише інерційні властивості АЦП, але й і швидкість змінювання вхідного сигналу, що дає можливість підвищити роздільну здатність пристроїв аналого-цифрового перетворення. Вперше запропоновано як тестовий для калібрування АЦП двотональний сигнал зі зміщенням, який на відміну від однотональних сигналів, дає можливість усунути вплив статичних похибок АЦП на оцінки динамічних похибок, а також підвищити адекватність процесу калібрування базового АЦП, результати якого можна поширювати на широкий клас вхідних сигналів пристрою аналого-цифрового перетворення.

Запропоновано новий метод коригування похибок лінійності АЦП при перетворенні високочастотних сигналів, який на відміну від існуючих базується при калібруванні на оцінюванні спотворень функції розподілу вхідного тестового сигналу, що дає можливість

повніше оцінити динамічні властивості контрольованого АЦП, а це створює умови для підвищення роздільної здатності АЦП у режимі коригування.

Розроблено інженерну методику побудови пристроїв аналого-цифрового перетворення з коригуванням динамічних похибок, на базі якої розроблено структури пристроїв аналого-цифрового перетворення та алгоритми калібрування базових АЦП.

Ключові слова: аналого-цифровий перетворювач, динамічні похибки, роздільна здатність, пристрій аналого-цифрового перетворення, тестові сигнали, коригування.

АННОТАЦИЯ

Бортник С.Г. Устройства аналого-цифрового преобразования с корректировкой динамических погрешностей. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – Компьютерные системы и компоненты. – Винницкий национальный технический университет, Винница – 2012.

Диссертация посвящена разработке методов повышения разрешающей способности устройств аналого-цифрового преобразования за счет корректировки динамических погрешностей, которые возникают при преобразовании широкого класса сигналов в компьютерных системах. Предложено новый метод корректировки динамических погрешностей АЦП, который в отличие от существующих предусматривает корректировку результатов аналого-цифрового преобразования в фазовой плоскости, при этом на каждом шаге квантования учитываются не только инерционные свойства АЦП, но и скорость изменения входного сигнала, что дает возможность повысить разрешающую способность устройств аналого-цифрового преобразования. Впервые предложено как тестовый для калибровки АЦП двухтональный сигнал со смещением, который в отличие от однотональных сигналов, дает возможность устранить влияние существующих статических погрешностей АЦП на оценки динамических погрешностей, а также повысить адекватность процесса калибрования базового АЦП, результаты которого можно расширять на широкий класс входных сигналов устройства аналого-цифрового преобразования.

Предложено новый метод корректировки погрешностей линейности АЦП при преобразовании высокочастотных сигналов, который в отличие от существующих базируется на оценке искажений функции распределения входного тестового сигнала, что дает возможность лучше оценить динамические свойства контролируемого АЦП, а это создает условия для повышения разрешающей способности АЦП в режиме корректировки.

Разработано инженерную методику построения устройств аналого-цифрового преобразования с корректировкой динамических погрешностей, на базе которой разработаны структуры устройств аналого-цифрового преобразования и алгоритмы калибровки базовых АЦП.

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь, динамические погрешности, разрешающая способность, устройство аналого-цифрового преобразования, тестовые сигналы, корректировка.

ABSTRACT

Bortnyk S.G. Devices of the analog-to-digital conversion with dynamic error correction. – A manuscript.

The thesis for a Ph.D. science degree by specialty 05.13.05 – Computer System and Components. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia – 2012.

The new method of the ADC dynamic error correction was suggested. This method as opposed to known provides the correction of the analog-to-digital conversion results in the phase plane, and not only inertia but also rate of the input signal is taken into consideration on each quantization step, this enables to raise the resolution of the analog-to-digital conversion devices. For the first time the bi-tone signal with shift, which as opposed to the one-tone signals enables to eliminate the influence of the static ADC errors on the estimation of the dynamic error and to raise

the adequacy of the calibration procedure of the basic ADC, results of which can be spread on the wide class of the input signals of the analog-to-digital conversion devices is suggested as test impact for ADC calibration. At the same time bi-tone test impacts can be easily implemented by means of existing certified generators of the harmonic signals or frequency synthesizers.

The analytic forms for the estimation of ADC effective number of bits were given further development, this makes possible to perform the estimation of the resolution of the ADC with phase-plane correction. It is shown that phase-plane correction allows increasing the effective number of bits by $2.0 \div 2.5$ bits depend on the input signal level and dynamic error value that results in increasing the resolution of the analog-to-digital conversion devices. The generalized criterion of ADC quality – energy factor, which defines its efficiency in the dynamic mode taking into consideration such ADC parameters as performance and resolution, was suggested. Analyze of ADC effective number of bits and energy factor which was made confirmed the high efficiency of the method of the phase-plane correction of the ADC dynamic errors.

The new method of ADC linearity error correction under conversion of the high-frequency signals which is based on estimation of the distortion of the distribution function of the input signal under calibration in opposed to known ones was suggested, that makes possible to estimate dynamic characteristics of controlled ADC fuller and it creates conditions to increase ADC resolution in the correction mode. The four-tone signal as most optimal type of the test impact which uses under statistic correction of the ADC linearity errors under conversion of the high-frequency signals was suggested for the first time. Analyze of the statistical conditions of this test signal is proved that it makes possible to ensure ADC functional modes, which are the adequate to actual on the one part, and on the other part – it is simply realized using wide nomenclature of the standard signal generators.

Analyze of the boundary resolution of the suggested statistical method of the linearity error correction was done. The analytic forms of the effective number of bits losses dependence on differential nonlinearity and normalized dynamic error which was given corroborate that statistical method of the ADC linearity error correction makes possible to increase effective number of bits by $1.5 \div 4.5$ bits depend on level of the distortion of the conversion characteristic of the basic ADC.

Engineering methodology of the analog-to-digital conversion devices with dynamic errors correction building was developed, based on it structures of the analog-to-digital conversion devices and algorithms of the basic ADC calibration was developed. It is shown that developed methodology makes possible to reduce specific redundancy of the LSI in the analog-to-digital conversion devices, because majority of the ADC blocks are used both in the calibration stage and in the work stage.

The computer simulation on the circuit scheme level and experimental investigations of the operating mockups of the 10-bits and 12-bits analog-to-digital conversion devices with 20 MHz and 10 MHz sampling rates respectively were done. Experimental investigations which was performed confirm the basic abstract theorems of the thesis. Comparison the results of the calculations of the dynamic parameters developed devices with experimental data which was given on the different mockups and under computer simulating, are corroborated the authenticity of the suggested methods and analytic forms in the thesis.

Keywords: analog-to-digital converter, dynamic errors, resolution, device of analog-to-digital conversion, test signal, correction.

Підписано до друку 05.04.2012 р. Формат 29,7×42¼
Наклад 100 прим. Зам. № 2012-045
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59