

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Г. Г. Бортник, В. М. Кичак, О. В. Стальченко

**АНАЛОГО-ЦИФРОВІ ТРАКТИ
КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ
З ЦИФРОВИМ ОБРОБЛЕННЯМ
ВИСОКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2016

УДК 004.3

ББК 32.88

Б21

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 8 від 28.01.2016 р.)

Рецензенти:

О. І. Рибін, доктор технічних наук, професор

О. В. Осадчук, доктор технічних наук, професор

Бортник, Г. Г.

Б21 Аналого-цифрові тракти комп'ютерних систем з цифровим обробленням високочастотних сигналів : монографія / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак, О. В. Стальченко. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 140 с.

ISBN 978-966-641-662-2

У монографії розглянуто методи та засоби аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів у комп'ютерних системах, побудованих на базі методології цифрового оброблення сигналів. Запропоновано низку оригінальних рішень як на рівні структур та алгоритмів функціонування, так і на рівні функціональних електричних схем.

Книга розрахована на науковців, аспірантів, студентів та фахівців, які займаються проектуванням і розробкою комп'ютерних систем, а також систем цифрового оброблення сигналів.

УДК 004.3

ББК 32.88

ISBN 978-966-641-662-2

© Г. Бортник, В. Кичак, О. Стальченко, 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ АЦТ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ З ЦИФРОВИМ ОБРОБЛЕННЯМ ВИСОКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ	9
1.1 Аналіз нелінійності АЦТ ВЧ-сигналів.....	9
1.2 Аналіз особливостей визначення нелінійності АЦТ.....	13
1.3 Аналіз методів коригування нелінійності в швидкодійних АЦП ВЧ-сигналів	17
1.4 Аналіз принципів цифрового коригування нелінійності АЦТ... ..	26
1.5 Вибір напрямків і постановка задачі досліджень	29
РОЗДІЛ 2 МЕТОД ЦИФРОВОГО КОРИГУВАННЯ НЕЛІНІЙНОСТІ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ТРАКТУ.....	31
2.1 Принципи цифрового коригування нелінійності АЦТ	31
2.2 Розробка математичної моделі нелінійності аналого-цифрового тракту в базисі дискретних функцій Фур'є	36
2.3 Гістограмне оцінювання диференціальної нелінійності АЦТ	40
2.4 Визначення нелінійності АЦТ на базі ДПУ	44
2.5 Аналіз ефективності методу коригування нелінійності АЦТ	51
2.6 Аналіз нелінійності тестового сигналу АЦТ.....	57
РОЗДІЛ 3 ОСНОВНІ АПАРАТНІ ТА ПРОГРАМНІ СКЛАДОВІ АЦТ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ З ЦИФРОВИМ ОБРОБЛЕННЯМ ВИСОКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ	60
3.1 Модифікований метод аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів з додаванням додаткового шумоподібного сигналу.....	60
3.2 Базовий АЦП аналого-цифрового тракту.....	69

3.3 Генератор тестових сигналів.....	75
3.4 Алгоритм цифрового оброблення сигналів АЦТ у базисі функцій Уолша	80
3.5 Алгоритм швидкого перетворення спектрів сигналу АЦТ з базису Уолша у базис Фур'є.....	84
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АЦТ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ З ЦИФРОВИМ ОБРОБЛЕННЯМ ВИСОКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ	
4.1 Інженерна методика побудови АЦТ комп'ютерних систем цифрового оброблення ВЧ-сигналів	89
4.2 Структурні схеми АЦТ	96
4.3 Комп'ютерне моделювання АЦТ перетворення ВЧ-сигналів.....	105
4.4 Результати експериментальних досліджень.....	113
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	
Додаток А Комп'ютерна модель АЦТ ВЧ-сигналів з 14-розрядним АЦП, що реалізує метод цифрового коригування нелінійності	136
Додаток Б Комп'ютерна модель АЦТ з 12-розрядним АЦП, що реалізує метод аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів з додаванням шуму.....	137
Додаток В Зовнішній вигляд макета АЦТ з цифровим коригуванням нелнійності.....	138
Додаток Г Зовнішній вигляд макета АЦТ з додатковим шумовим сигналом.....	139

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП	–	аналого-цифровий перетворювач
АЦТ	–	аналого-цифровий тракт
БЗП	–	буферний запам'ятовувальний пристрій
БК	–	блок керування
ВІС	–	велика інтегральна схема
ВСВ	–	взаємні спектральні відображення
ГТІ	–	генератор тактових імпульсів
ДПУ	–	дискретне перетворення Уолша
ДПФ	–	дискретне перетворення Фур'є
ІМС	–	інтегральні мікросхеми
КНЕ	–	коригувальний нелінійний елемент
ОЗП	–	оперативний запам'ятовувальний пристрій
ОМР	–	одиниця молодшого розряду
ПВЗ	–	пристрій вибірки-зберігання
ПЗП	–	постійний запам'ятовувальний пристрій
ПК	–	персональний комп'ютер
ПЛМ	–	програмована логічна матриця
ТКЗ	–	таблиця коригувальних значень
ХП	–	характеристика перетворення
ЦАП	–	цифро-аналоговий перетворювач
ЦОС	–	цифрова обробка сигналів
ШПУ	–	швидке перетворення Уолша
ШПФ	–	швидке перетворення Фур'є

ВСТУП

Розвиток і розширення сфер використання комп'ютерних систем оброблення високочастотних (ВЧ) сигналів неможливі без покращення характеристик засобів аналого-цифрового перетворення. Аналого-цифровий тракт (АЦТ), що є однією з найважливіших складових сучасних і перспективних комп'ютерних систем цифрового оброблення ВЧ-сигналів, в значній мірі встановлює їх граничні можливості як за швидкістю, так і за динамічним діапазоном. Тому удосконалення АЦТ ВЧ-сигналів відбувається як шляхом підвищення смуги частот перетворюваних сигналів, так і шляхом розширення динамічного діапазону.

Особливий інтерес до швидкодійних АЦТ з широким динамічним діапазоном обумовлений тим, що в багатьох комп'ютерних системах все частіше використовуються схеми прямого перетворення сигналів без проміжного перетворення частоти, активно розвиваються і широкосмугові пристрої. У більшості цих систем є важливим, щоб АЦТ мав широкий динамічний діапазон для однозначного реєстрування як сильних за рівнем, так і слабких сигналів. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) є ключовим елементом АЦТ ВЧ-сигналів, що визначає його частотні характеристики. Але останніми роками ситуація з пропозиціями елементної бази швидкодійних АЦП радикально змінилась. Відбувається стрімкий прорив у галузі створення надшвидкодійних мікросхем АЦП. Тому основну увагу розробники комп'ютерних систем ВЧ-сигналів зосереджують на розширенні динамічного діапазону АЦТ.

Слід зазначити, що максимальний динамічний діапазон АЦТ у значній мірі залежить від частотної смуги вхідних сигналів. Так, 16-розрядні АЦТ з динамічним діапазоном до 96 дБ широко поширені для низькочастотних сигналів. Водночас для ВЧ-сигналів такий динамічний діапазон є недосяжним. Тому великий інтерес викликають АЦТ, які при заданій частоті дискретизації забезпечують широкий динамічний діапазон.

Задачами створення високопродуктивних АЦТ займалися і продовжують займатись вітчизняні наукові школи О. Д. Азарова [1–6], А. І. Кондалева [7–10]. Загальні принципи побудови АЦТ ВЧ-сигналів досліджувались науковою школою В. Б. Смолова [11–13]. Розроблен-

ням методів покращення динамічних характеристик АЦТ займаються такі вчені, як Ю. Дженк [14, 15], М. М. Гельман [16–18], У. Кестер [19–24], В. О. Маковій [25–31], Х. Лундин [32–36].

Великий вклад у побудову швидкодійних інтегральних мікросхем (ІМС) аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) з покращеними динамічними параметрами внесли Е.-А. К. Багданскіс та А.-Й. К. Марцинкявічус [37, 38]. Слід відзначити також дослідження В. В. Островерхова, які дозволили розкрити механізм обмеження динамічного діапазону АЦТ [39–42].

Значна кількість продукції світових лідерів аналого-цифрової техніки фірм Analog Devices, Burr-Brown, Maxim, Datal, Intersil, Linear Technology, National Semiconductor, Venta та Signal Processing Technologies є пристроями аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів [43–57]. Однак, використання відомих методів та підходів у швидкодійних АЦТ ВЧ-сигналів не дозволяють реалізувати потенційно досяжний динамічний діапазон. Це пояснюється тим, що реальні тракти аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів вносять суттєві спотворення в цифрове представлення сигналів у вигляді паразитних спектральних складових, що обумовлені як нелінійністю окремих функціональних елементів АЦТ, так нелінійністю характеристики перетворення (ХП) усього тракту. У свою чергу, паразитні складові спектра, що виникають у вихідному сигналі АЦТ, спричиняють до обмеження динамічного діапазону тракту і відповідно комп'ютерної системи цифрового оброблення ВЧ-сигналів.

У зв'язку з вищенаведеним, розроблення нових методів і засобів підвищення лінійності характеристики перетворення АЦТ комп'ютерних систем з цифровим обробленням ВЧ-сигналів є актуальною науковою задачею, розв'язання якої має важливе значення для науки та виробництва, оскільки сприяє вдосконаленню відомих і створення нових АЦТ ВЧ-сигналів з широким динамічним діапазоном.

У першому розділі виконано аналіз напрямків розвитку АЦТ високочастотних сигналів з коригуванням нелінійності. Здійснено аналіз нелінійності аналого-цифрових трактів ВЧ-сигналів та особливостей визначення нелінійності АЦТ. Проведено аналіз методів коригування нелінійності в швидкодійних АЦП високочастотних сигналів, а також проаналізовано принципи цифрового коригування нелінійності АЦТ.

У другому розділі наведено метод цифрового коригування нелінійності аналого-цифрового тракту. Виконано теоретичне обґрунтування принципів цифрового коригування нелінійності АЦТ ВЧ-сигналів. Здійснено розробку математичної моделі нелінійності аналого-цифрового тракту в базисі дискретних функцій Фур'є. Розглянуто гістограмне оцінювання диференціальної нелінійності АЦТ. Проведено визначення нелінійності АЦТ на базі дискретного перетворення Уолша. Виконано аналіз ефективності методу коригування нелінійності АЦТ та здійснено аналіз нелінійності тестового сигналу АЦТ.

У третьому розділі здійснено синтез та аналіз основних апаратних і програмних складових АЦТ з коригуванням нелінійності, здійснено розробку модифікованого методу аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів з додаванням додаткового шумоподібного сигналу, виконано розробку базового АЦП аналого-цифрового тракту, проведено розробку генератора тестових сигналів на базі реалізації таблично-алгоритмічного методу з кусково-лінійною апроксимацією випробувальної функції, виконано побудову алгоритму швидкого перетворення спектрів сигналу АЦТ з базису Уолша в базис Фур'є, який реалізовано на базі моделі взаємних спектральних перетворень

В четвертому розділі розглядається розроблена інженерна методика побудови аналого-цифрових трактів перетворення високочастотних сигналів, яка дала можливість створювати комп'ютерні системи цифрового оброблення ВЧ-сигналів з широким динамічним діапазоном. Розроблено структуру АЦТ перетворення ВЧ-сигналів, в якому застосовуються метод цифрового коригування нелінійності АЦТ, а також блок-схему алгоритму калібрування ХП АЦТ. Розроблено структури АЦТ перетворення ВЧ-сигналів на базі модифікованого методу аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів з додаванням додаткового шумоподібного сигналу. Проведено комп'ютерне моделювання запропонованих структур пристроїв. Наведено результати експериментального дослідження макетів АЦТ перетворення ВЧ-сигналів.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ АЦТ

КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ З ЦИФРОВИМ ОБРОБЛЕННЯМ

ВИСОКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ

У цьому розділі виконано аналіз нелінійності аналого-цифрових трактів ВЧ-сигналів та особливостей визначення нелінійності АЦТ. Проведено аналіз методів коригування нелінійності в швидкодійних АЦП високочастотних сигналів, а також проаналізовано принципи цифрового коригування нелінійності АЦТ. Здійснено вибір напрямків і постановку задачі досліджень.

1.1 Аналіз нелінійності АЦТ ВЧ-сигналів

Один з основних блоків сучасних систем з цифровим обробленням ВЧ-сигналів аналого-цифровий тракт, внаслідок різних технічних особливостей виробництва інтегральних мікросхем (ІМС) і активних елементів, характеризується нелінійною амплітудною характеристикою.

Структурна схема типового АЦТ ВЧ-сигналів, з точки зору нелінійності амплітудної характеристики, наведена на рис. 1.1 [27].



Рисунок 1.1 – Структурна схема нелінійного аналого-цифрового тракту

Вхідний сигнал після проходження лінійного підсилювача надходить на вхід нелінійного елемента (НЕ), який описує нелінійність амплітудної характеристики аналогового тракту. Основний вклад в нелінійність такого АЦТ вносить буферний підсилювач, який здійснює узгодження частотно-вибірних входних кіл із входом аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Далі сигнал за допомогою АЦП перетворюється в цифрову форму і надходить в блок цифрової обробки сигналу (БЦОС), в якому реалізуються алгоритми первинної цифрової обробки ВЧ-сигналів.

Для аналізу властивостей нелінійності подамо АЦП у вигляді послідовного з'єднання лінійного дискретизатора і нелінійного квантувача за рівнем. Нелінійність дискретизатора відносно невелика та враховується в НЕ АЦП. Нелінійний квантувач можна представити у вигляді послідовного з'єднання рівномірного лінійного квантувача (ЛК) і неперервного НЕ, який створює нелінійність, еквівалентну нелінійності амплітудної характеристики дискретизатора та квантувача, які входять в АЦП. Нелінійність при послідовному з'єднанні НЕ і ЛК виникає, як і в реальному АЦП, внаслідок відхилення фактичних напруг міжкодових переходів S'_i від їх номінальних значень S_i при незмінних вихідних кодах Q_i . Результируюча характеристика перетворення (ХП) такої еквівалентної схеми збігається з ХП реального АЦП, якщо ХП АЦП задовольняє умову [28]

$$f(S'_i) = S_i, \quad i = 1 \dots 2^n, \quad (1.1)$$

де n – розрядність вихідного коду ЛК.

Аналітично сумарну характеристику передавання реального АЦП з урахуванням його нелінійності можна подати як суму лінійної (kS) та нелінійної $\varphi(S)$ функцій

$$f(S) = k \cdot S + \varphi(S), \quad (1.2)$$

де S – миттєве значення вхідного сигналу нелінійного квантувача.

При $k = 1$ значення функції $f(S)$ досягає значення напруги міжкодового переходу S_i лінійного квантувача при вхідному сигналі

$$S'_i = S_i + \Delta S_i, \quad (1.3)$$

де ΔS_i – відхилення напруги i -го міжкодового переходу реального квантувача від номінального значення.

Підставивши (1.3) в (1.2), з урахуванням (1.1), отримаємо

$$\Phi(S_i + \Delta S_i) = -\Delta S_i. \quad (1.4)$$

При аналого-цифровому перетворенні аналогового або дискретного за часом сигналу будь-якої величині, яка знаходиться в інтервалі від S_{i-1} до S_i , буде поставлений у відповідність код Q_i . Відповідно, не існує способу розрізнити ХП АЦП, які утворені за допомогою різних НЕ, якщо їх значення в обмеженій кількості точок задовольняють умову (1.1). Ця кількість точок дорівнює кількості міжкодових переходів і може бути знайдена як $N - 1$, де N – кількість різних вихідних кодів квантувача. Якщо в АЦП використовуються всі можливі при даній розрядності вихідні коди, то $N = 2^n$, де n – розрядність вихідної шини АЦП.

У роботі [31] доведено, що характеристика перетворення НЕ АЦП є поліномом степеня $N - 2$:

$$f(S) = \sum_{i=1}^{N-2} b_i S^i, \quad (1.5)$$

де b_i – коефіцієнт поліному при степені i ; S – миттєве значення вхідного сигналу НЕ; $N - 1$ – кількість міжкодових переходів у лінійному квантувачі.

Функція, яка проходить через $N - 1$ – задану точку, є поліномом степеня не менш, ніж $N - 2$ для кожного конкретного НЕ. Наявність перед АЦП НЕ, який враховує амплітудну характеристику аналогової частини АЦТ (див. рис. 1.1), не змінює узагальнення наведених вище міркувань. НЕ, який описує нелінійні властивості аналогового тракту, і послідовно з'єднаний з ним НЕ АЦП можуть розглядатись як один НЕ. Такий НЕ назвемо НЕ АЦТ, і, відповідно, структурна схема нелінійного АЦТ матиме вигляд, наведений на рис. 1.2 [27].

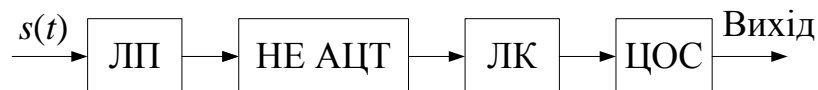


Рисунок 1.2 – Еквівалентна структурна схема АЦТ

Для АЦТ у процесі проходження і обробки сигналу важливо не допустити обмеження сигналу при аналого-цифровому перетворенні. При перевищенні миттєвих значень сигналу межі ЛК внаслідок ефек-

ту обмеження в АЦП виникають паразитні продукти нелінійності. В процесі проходження сигналу трактом при підсиленні та послабленні його діапазон допустимих миттєвих значень змінюється.

Вхідним діапазоном НЕ будемо називати інтервал на передатній характеристиці, який відповідає інтервалу можливих значень вхідного сигналу. Для НЕ, які встановлені перед ЛК, вхідний діапазон відповідає значенням вхідного сигналу, при яких не відбувається переповнення в ЛК в результаті перетворення сигналу в цифрову форму. Для опису цифрових НЕ використовують поняття повної шкали (Full Scale, FS) [58]. Вихідний код ЛК може приймати значення від +FS до -FS, що відповідає значенню нормованого діапазону 2FS в цифрових НЕ. Якщо необхідно подати на вхід НЕ з нормованим діапазоном сигнал з відомим діапазоном миттєвих значень, то можна застосувати перетворення

$$s'(t) = \frac{2 \cdot s(t)}{S_{\max} - S_{\min}} - \frac{S_{\max} + S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}}, \quad (1.6)$$

де S_{\max} – найбільше миттєве значення вхідного сигналу $S(t)$; S_{\min} – найменше миттєве значення вхідного сигналу $S(t)$; $s(t)$ – початковий сигнал; $s'(t)$ – сигнал для НЕ з нормованим діапазоном.

Вхідний діапазон НЕ в АЦТ створюється вихідними кодами лінійного квантувача Q_i . Ці величини є фіксованими та незмінними.

Основні відмінності НЕ, який характеризує нелінійність АЦТ, від НЕ, який описує нелінійність аналогового тракту такі:

- можливість точного опису за допомогою поліноміальної апроксимації, незалежно від джерел нелінійності;
- кінцевий порядок апроксимувального поліному при точному описі нелінійності в АЦТ;
- наявність вхідного та вихідного динамічного діапазону НЕ з межами діапазону допустимих (можливих) значень.

При аналізі НЕ АЦТ одним з ключових питань є вибір форми тестового сигналу, який застосовується для дослідження тракту. Наприклад, для інтерполяції за Лагранжем необхідно використовувати генератор сходиноквої напруги. Для досліджень в системі з ЦОС такий тестовий сигнал не використовується внаслідок обмежень на частотну

смугу пропускання. Основною вимогою до тестового сигналу слід вважати низький рівень нелінійних спотворень [59]. З точки зору простоти формування найбільш вдалим вирішенням є синусоїдальний тестовий сигнал. Точність форми такого сигналу може бути покращена вузькосмуговим фільтром до будь-якої раніше визначеної величини.

1.2 Аналіз особливостей визначення нелінійності АЦТ

Нелінійність АЦТ може бути визначена на базі відомої ХП, тобто залежності між значеннями вхідного аналогового сигналу та вихідного коду. На рис. 1.3 наведена характеристика перетворення однополярного АЦТ, для якого опорна напруга U_{REF1} дорівнює нулю.

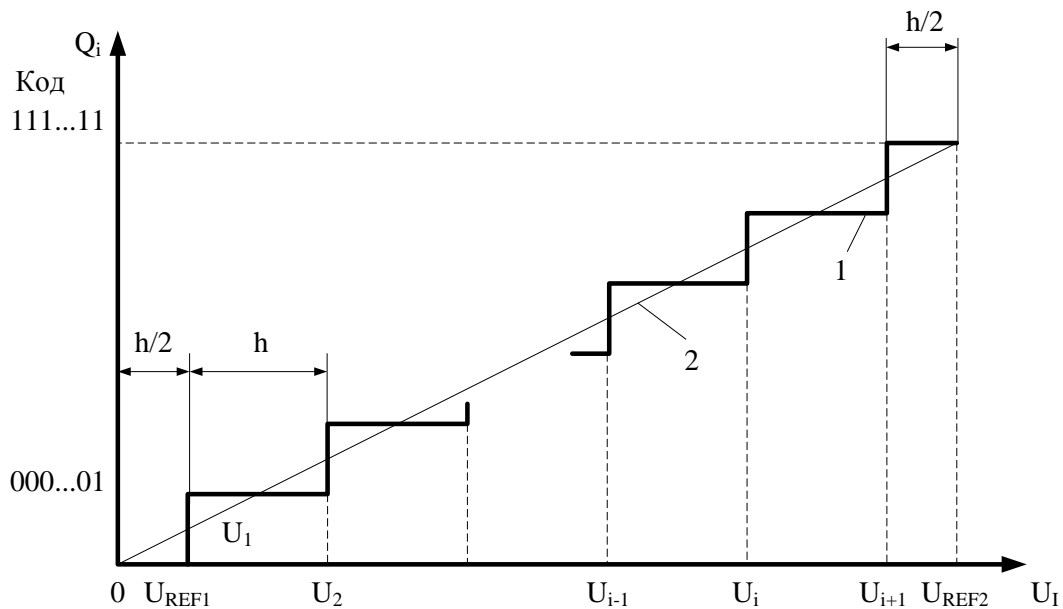


Рисунок 1.3 – Характеристика перетворення ідеального АЦТ (1) і пряма, яка проведена через центри сходинок ХП (2)

Різниця значень напруг заданого і наступного за ним міжкодових переходів визначає крок квантування ХП АЦТ. Для того, щоб пряма, проведена через точки, які відповідають опорним напругам U_{REF1} і U_{REF2} , пройшла через центри всіх сходинок ХП ідеального АЦТ, напруга першого міжкодового переходу U_1 має відрізнятись від напруги U_{REF1} на величину, яка дорівнює половині кроку квантування ХП [60].

Аналогічно напруга останнього міжкодового переходу U_{i+1} повинна відрізнятися від опорної напруги U_{REF2} також на половину кроку квантування ХП. Для ідеального АЦТ ширина сходинки дорівнює кроку квантування [61]:

$$h = (U_{REF2} - U_{REF1}) / (2^{n-1}). \quad (1.7)$$

Реальна ХП АЦТ може значно відрізнятися від ідеальної. Ці відмінності містяться в неідентичності кроків квантування, в положенні ХП відносно осей координат, у відхиленні ХП від прямої та в неідеальності профілю міжкодового переходу. Невідповідність номінальної (ідеальної для коректної реалізації АЦТ) та дійсної характеристик перетворення і визначає параметри точності АЦТ: напруга зміщення нуля; відхилення коефіцієнта перетворення від номінального значення; не лінійність [62].

Нелінійність АЦТ – відхилення дійсного значення вхідної напруги, яке відповідає заданій точці ХП, від значення, яке визначається по лінеаризованій ХП у тій же точці. Цей параметр характеризує відхилення центрів сходинок дійсної ХП від прямої лінії, яка апроксимує номінальну ХП (рис. 1.4).

Існує велика кількість методик визначення нелінійності. Розглянемо дві з них, які відрізняються способом проведення прямої, яка апроксимує номінальну ХП: нелінійність визначається відносно прямої, яка проведена через середини сходинок, які відповідають кодам 000...01 і 11111...10 дійсної ХП; нелінійність визначається відносно деякої прямої, яка проведена оптимальним чином для дійсної ХП [63, 64]. Найчастіше така оптимізація здійснюється за методом найменших квадратів. Для АЦТ з розрядністю вищою 6 біт не лінійність, як правило визначається відносно оптимізованої прямої, що дозволяє в низці випадків отримати результат вдвічі кращий, ніж відносно до неоптимізованої прямої. Через велику складність виготовлення та високу вартість АЦТ такий підхід є економічно та технічно виправданим, оскільки при розв'язанні прикладних задач в галузі аналогоцифрового перетворення ВЧ-сигналів має значення лише ступінь збіжності дійсної ХП з деякою лінеаризувальною прямою.

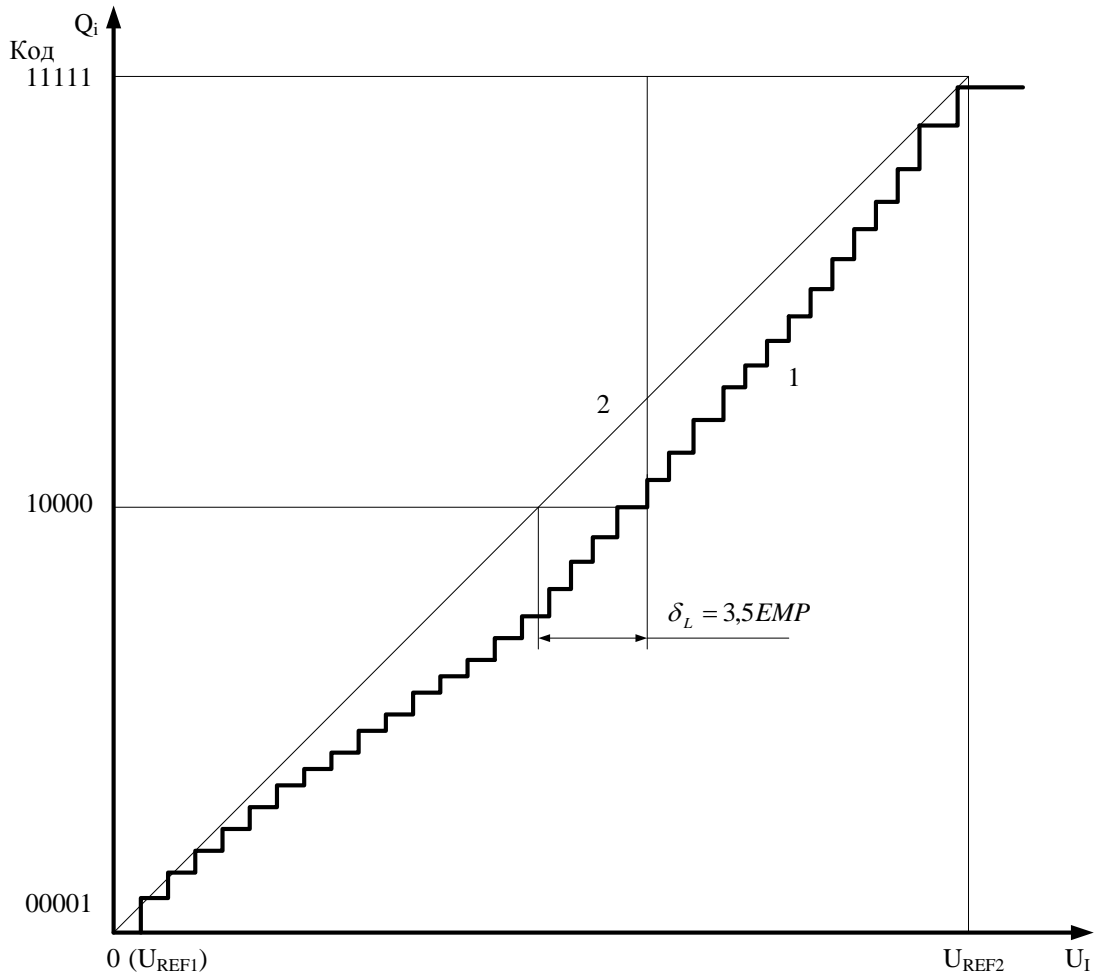


Рисунок 1.4 – Характеристика перетворення АЦТ з нелінійністю:
 1 – дійсна ХП; 2 – пряма, яка відповідає номінальній ХП

Визначення параметрів ХП починається з визначення напруг усіх рівнів квантування та запам'ятовування їх значень в пам'яті кодера. Далі за значеннями двох сусідніх рівнів квантування визначається середнє значення сходинки квантування i -го коду [64]

$$U_{i\text{cp}} = (U_i + U_{i+1}) / 2, \quad (1.8)$$

яке використовується для розрахунку нелінійності, напруги зміщення нуля та коефіцієнта перетворення.

Нелінійність 6–8 розрядних АЦТ оцінюється відносно прямої, яка з'єднує початкову та кінцеву точку ХП, тому для i -го коду [64]

$$\delta_{Li} = [U_{i\text{cp}} - U_{j\text{cp}} - (i-1)\bar{h}] / \bar{h}. \quad (1.9)$$

Для АЦТ з розрядністю вищою 8 нелінійність оцінюється відносно прямої апроксимувальної ХП за методом найменших квадратів [65]

$$y = Ax + B, \quad (1.10)$$

де A – коефіцієнт, який характеризує напругу зміщення нуля; B – коефіцієнт перетворення.

$$A = \left\{ \left[\left(\sum_{i=1}^N i \sum_{i=1}^N U_{i \text{ cp}} \right) / N - \sum_{i=1}^N i U_{i \text{ cp}} \right] / \left\{ \left[\left(\sum_{i=1}^N i \right)^2 / N \right] - \sum_{i=1}^N i^2 \right\} \right\};$$

$$B = \left[\left(\sum_{i=1}^N U_{i \text{ cp}} \right) / N \right] - \left(A \sum_{i=1}^N i \right) / N. \quad (1.11)$$

Якщо коефіцієнти A і B відомі, то нелінійність в ОМР

$$\delta_{Li} = (U_{i \text{ cp}} - kA - b) / \bar{h}. \quad (1.12)$$

Нормування нелінійності здійснюється по всіх точках при заданих гранично допустимих значеннях вхідного сигналу АЦТ.

На базі вхідних значень нелінійності можна обчислити динамічний діапазон за інтермодуляцією [29]:

$$D_{IM} = 20 \lg \left[\frac{2}{3 \cdot \delta_L \cdot 2^{-n}} \right]. \quad (1.13)$$

У той же час значення динамічного діапазону по блокуванню в АЦТ можна визначити за виразом [31]:

$$D_B = SNR - SINAD - D_A + 20 \lg Q_f, \quad (1.14)$$

де SNR – відношення потужності синусоїдального сигналу до сумарної потужності усіх сторонніх складових, окрім перших шістьох гармонік сигналу; $SINAD$ – відношення потужності сигналу до сумарної

потужності шумів; D_A – показник збільшення шумів АЦТ за рахунок додаткових шумів аналогового тракту; Q_f – коефіцієнт обмеження блокувального сигналу (на практиці задається значення 0,953 дБ).

У роботах [31, 66] наведено аналіз параметрів АЦТ ВЧ-сигналів на базі серійних мікросхем швидкодійних АЦП. Результати аналізу дозволяють зробити висновок, що в середньому потенційно досяжний динамічний діапазон за інтермодуляцією на 30–40 дБ менший динамічного діапазону АЦТ ВЧ-сигналів по блокуванню.

1.3 Аналіз методів коригування нелінійності в швидкодійних АЦП ВЧ-сигналів

Основою побудови АЦТ ВЧ-сигналів є швидкодійний АЦП. Саме динамічні характеристики АЦП визначають результуючий динамічний діапазон усього АЦТ. Існує два основних методи побудови швидкодійних АЦП ВЧ-сигналів: зчитування та конвеєрний.

Максимальну швидкодію мають АЦП безпосереднього зчитування, які називають також паралельними, вони містять 2^n елементів порівняння вхідної аналогової величини з відповідним набором порогових рівнів (n – розрядність вихідного двійкового коду) і перетворювач коду з виходів елементів порівняння в позиційний двійковий код. Такі пристрої здійснюють перетворення за один такт роботи, причому в сучасних АЦП досягнуто тривалість такту біля 1 нс при апертурній невизначеності зняття відліку менше 0,1 нс [38, 62].

Однак створення паралельних АЦП з розрядністю більше 10 в найближчий час малоймовірно в зв'язку зі значним зростанням кількості компараторів, які важко розмістити в одній інтегральній схемі і достатньо точній стабілізації порогових рівнів компараторів. Тому при побудові широкодіапазонних швидкодійних АЦП ВЧ-сигналів слід орієнтуватися на комбінаційні структури.

Далі розглянемо характеристики конвеєрних АЦП, їх методи побудови, а також проведемо порівняльний аналіз існуючих конвеєрних АЦП. До основних переваг конвеєрних АЦП слід віднести такі: висока швидкість перетворення, час перетворення $t_n < 10$ нс; мала ймовірність появи невизначеного результуючого коду. Водночас конвеєрні АЦП мають низку недоліків, а саме: низька лінійність ХП, чутливість

до нестабільності тактової частоти. Існуючі технології виготовлення ІМС конвеєрних АЦП не забезпечують високий рівень лінійності конвеєрного АЦ-перетворення, який переважно визначається відхиленням параметрів від заданих значень пристроїв вибірки-зберігання (ПВЗ), пристроїв підсилення різниці, помилок каскадних АЦП та цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) [67].

Одним із підходів, що застосовується у структурах конвеєрних АЦП для коригування нелінійностей, що вносяться каскадними АЦП, ЦАП, ПВЗ та підсилювачем різниці, є використання перекриття на один і більше розрядів, а також структурна схема може ускладнюватися шляхом уведення додаткових ПВЗ, буферних підсилювачів і т. і.

Для досягнення високої лінійності крім високих вимог до точності каскадних ЦАП, дуже важливо точно встановити коефіцієнт підсилення каскадних підсилювачів різниці та врахувати напругу зсуву, а також забезпечити низький температурний та часовий дрейф характеристик усього конвеєрного АЦП. Особливості функціонування конвеєрних АЦП не дають можливості використовувати відомі підходи підвищення динамічного діапазону порозрядних АЦП шляхом інформаційної надлишковості [1].

Конвеєрний аналого-цифровий перетворювач традиційно складається з декількох послідовних каскадів. Кожен каскад складається зі схеми вибірки зберігання, флеш-АЦП низької роздільної здатності та каскаду підсумовування, включаючи міжкаскадний підсилювач. Виходи кожного каскаду об'єднуються у вихідному блоці затримки та коригування (рис. 1.5).

У каскаді 1 вибірка вхідного аналогового сигналу грубо порівнюється зі зразковою пороговою величиною. В результаті порівняння отримується старший біт, який надходить до першого блока затримки (Затримка 1). У той час, коли залишок першого каскаду перетворюється на наступних n – каскадах, значення старшого біта проходить через n блоків затримки, щоб збігатися у часі з кінцем перетворення останнього каскаду. Потім усі біти даних формуються на виході та надходять на шину даних. Але наявність недосконалостей схеми, таких як, наприклад, похибка зсуву, масштабу, похибка нелінійності, не дозволяє отримувати широкий динамічний діапазон.

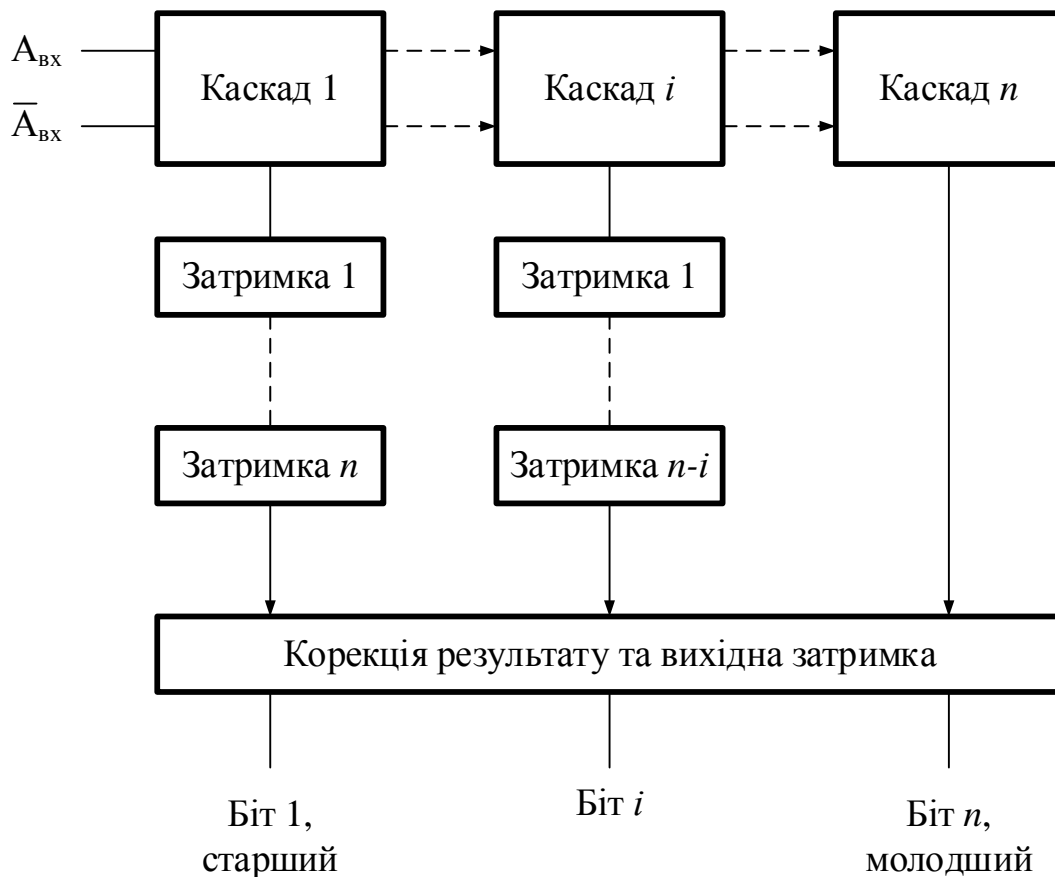


Рисунок 1.5 – Узагальнена структура конвеєрного АЦП

Розглянемо конвеєрні АЦП фірми MAXIM, у яких використання конвеєрного підходу дозволило забезпечити оптимальний баланс розмірів мікросхем, швидкості перетворення (1 МГц) та роздільної здатності (14 біт). Блок перетворення конвеєрних перетворювачів типу MAX1200 складається з L ($L=5$) M -розрядних каскадів врівноваження (у даному випадку $M=4$), на виході останнього з яких стоїть високоточний K -розрядний паралельний АЦП ($K=7$) (рис. 1.6) [19]. Цифрове коригування виконується шляхом отримання додаткових бітів, у цьому випадку виконується співвідношення

$$L \cdot M + K > N, \quad (1.15)$$

де N – кінцева роздільна здатність перетворювача.

Так, для конвеєрних перетворювачів MAX1200 це співвідношення набуде вигляду: $5 \cdot 4 + 7 > 14$, тобто 13 додаткових бітів використовуються для цифрового коригування отриманого результату [46].

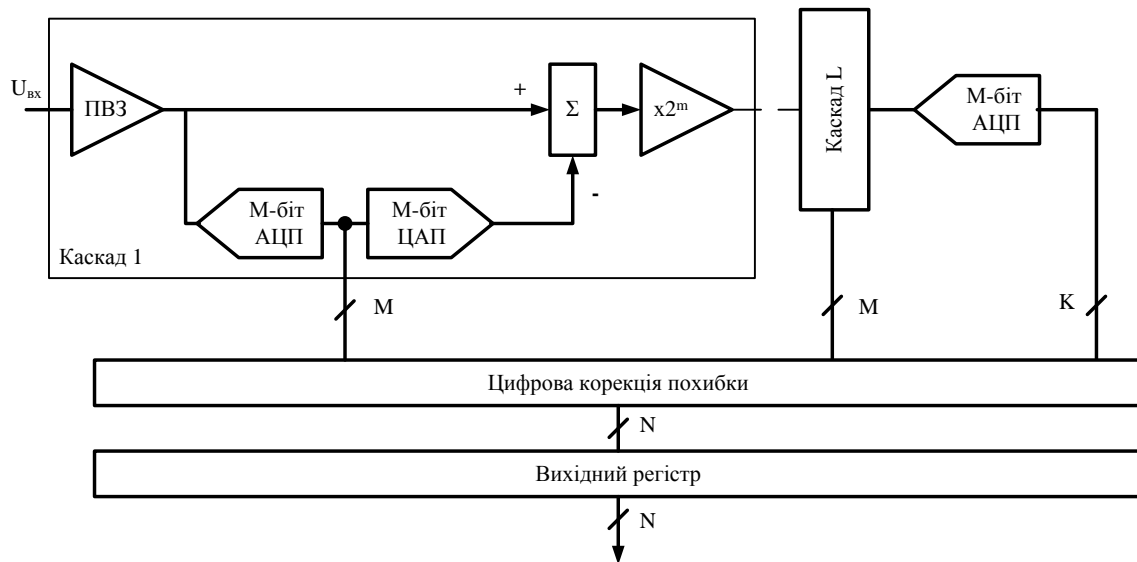


Рисунок 1.6 – Структурна схема конвеєрних АЦП типу MAX1200

Найбільший інтерес викликає паралельно-послідовна структура АЦП (ППАЦП), яка потенційно має найбільшу швидкодію серед конвеєрних. У подальшому розглядаються лише такі перетворювачі, хоча запропоновані методи коригування нелінійностей можна застосовувати і в інших комбінованих структурах, які використовують ЦАП в якості міри.

У ППАЦП, схема якого наведена на рис. 1.7, АЦП1, який реалізує метод безпосереднього зчитування, виконує грубе кодування вхідного сигналу, формуючи на своєму виході код N_1 – двійковий еквівалент цілої частини відношення вхідної напруги до кванта АЦП1. Цей код перетворюється в неперервний сигнал, а підсилена різниця цього сигналу і вхідного сигналу, яка є помилкою квантування АЦП1 після фіксації коду АЦП1 та закінчення перехідних процесів в ЦАП і різницевому підсилювачі, перетворюється АЦП2 у код N_2 , який підсумовується з N_1 [63].

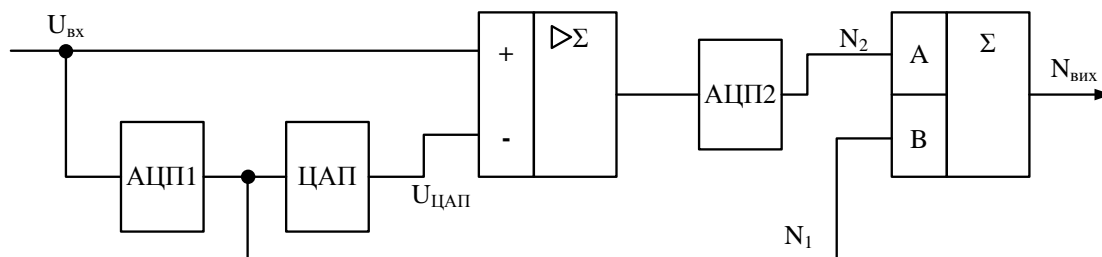


Рисунок 1.7 – Паралельно-послідовний АЦП

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Азаров О. Д. Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі надлишкових систем числення з ваговою надлишковістю : монографія / О. Д. Азаров – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 232 с.
2. Азаров О. Д. Конвеєрні аналого-цифрові перетворювачі з ваговою надлишковістю: монографія / О. Д. Азаров, О. В. Шапошніков, С. М. Захарченко – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 157 с.
3. Крупельницький Л. В. Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів : монографія / Л. В. Крупельницький, О. Д. Азаров ; під. заг. ред. О. Д. Азарова. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005 – 167 с.
4. Азаров О. Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення : монографія / О. Д. Азаров – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004 – 260 с.
5. Азаров О. Д. Високолінійні порозрядні АЦП з ваговою надлишковістю для систем реєстрації і оброблення сигналів : монографія / О. Д. Азаров, О. А. Архипчук, С. М. Захарченко – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 125 с.
6. Азаров О. Д. Аналого-цифрові інтерфейси ЕОМ : навч. посіб. / О. Д. Азаров, В. П. Марценюк, Н. О. Біліченко – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 178 с.
7. Преобразователи формы информации для малых ЭВМ / А. И. Кондалев, В. А. Багацкий, В. А. Романов, В. А. Фабричев – К. : Наукова думка, 1982. – 312 с.
8. Высокопроизводительные преобразователи формы информации / А. И. Кондалев, В. А. Багацкий, В. А. Романов, В. А. Фабричев. – К. : Наукова думка, 1987. – 280 с.
9. Преобразователи формы информации с обработкой данных / В. А. Багацкий, Ю. М. Грешищев, И. В. Самус, В. А. Фабричев ; под. ред. А. И. Кондалева. – К. : Наукова думка, 1992. – 264 с.
10. Романов В. А. Параметры АЦП общего применения и быстродействующих АЦП / В. А. Романов // Электронные компоненты и системы. – 2001. – № 8. – С. 24–25.

11. Смоллов В. Б. Микроэлектронные цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи информации / Смоллов В. Б., Угрюмов Е. П., Шмидт В. К.; под. ред. В. Б. Смоллова. – Л. : Энергия, 1976. – 336 с.
12. Грушвицкий Р. И. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем / Р. И. Грушвицкий, А. Х. Мурсаев, В. Б. Смоллов. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1989. – 160 с.
13. Информационные системы: Табличная обработка информации / Е. П. Балашов, В. Н. Негода, Д. В. Пузанков [и др.]; под ред. Е. П. Балашова и В. Б. Смоллова. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1985. – 184 с.
14. Jenq Y. Digital spectra of nonuniformly sampled signals: theories and applications / Y. Jenq // IEEE Trans. on Instrum. and Measurement. – 1990. – № 6. – P. 969–971.
15. Jenq Y. Measuring distortion and noise floor of an A/D converter using spectral averaging / Y. Jenq // IEEE Trans. on Instrum. and Measurement. – 1988. – № 4. – P. 525–528.
16. Гельман М. М. Системные аналого-цифровые преобразователи и процессоры сигналов / М. М. Гельман. – М. : Мир, 1999. – 559 с.
17. Гельман М. М. Дискретное преобразование и кодирование широкополосных сигналов / М. М. Гельман, Б. М. Степанов, В. Н. Филинов. – М. : Радио и связь, 1985. – 160 с.
18. Гельман М. М. Аналого-цифровые преобразователи для информационно-измерительных систем / М. М. Гельман. – М. : Изд.-во стандартов, 1989. – 320 с.
19. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование / Уолт Кестер. – М. : Техносфера, 2007. – 1016 с.
20. Кестер У. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов / Уолт Кестер. – М. : Техносфера, 2010. – 328 с.
21. Кестер У. Входной шум АЦП: всегда ли нужно с ним бороться? / У. Кестер // Электронные компоненты и системы. – 2006. – № 5. – С. 3–8.

22. Кестер У. Как правильно выбрать АЦП? / У. Кестер // Электронные компоненты и системы. – 2005. – № 12. – С. 12–18.
23. Kester W. DSP Test techniques keep ADC's in check / Kester W. // EDN. – 1990. – № 2. – P. 133–136, 138, 140, 142.
24. Kester W. Flash ADC's provide the basis for high-speed conversion / Kester W. // EDN. – 1990. – № 1. – P. 101–106, 108, 110.
25. Маковий В. А. Расширение динамического диапазона реальных АЦП методами цифровой коррекции / В. А. Маковий // Радиотехника. – 1990. – № 6. – С. 24–27.
26. Маковий В. А. Динамический диапазон дискретизатора / В. А. Маковий // Радиотехника. – 1991. – № 6. – С. 40–42.
27. Маковий В. А. Моделирование нелинейности аналого-цифрового тракта интегрированных радиоприемных устройств / В. А. Маковий // Техника средств связи. Сер. ТРС. – 1990. – Вып. 3. – С. 70–76.
28. Маковий В. А. Расчет аналого-цифрового тракта программно-определяемого радиосредства / В. А. Маковий // Теория и техника радиосвязи. – 2010. – № 2. – С. 65–73.
29. Маковий В. А. Нелинейные искажения и интермодуляционная избирательность в аналого-цифровых трактах ДКМВ диапазона / В. А. Маковий // Теория и техника радиосвязи. – 2012 – № 2. – С. 83–94.
30. Маковий В. А. Имитационное моделирование широкополосного аналого-цифрового тракта программно-определяемых радиоустройств / В. А. Маковий // Теория и техника радиосвязи. – 2011. – № 2. – С. 57–68.
31. Маковий В. А. Цифровая коррекция комбинаций в SDR радиостанциях / В. А. Маковий // Теория и техника радиосвязи. – 2012. – № 3. – С. 25–34.
32. Lundin H. On external calibration of analog-to-digital converters. / H. Lundin, M. Skoglund, P. Handel // IEEE Workshop on Statistical Signal Processing : proceedings of the conference, Singapore. – August 2001. – P. 377–380.

33. Lundin H. ADC post-correction using limited resolution correction values / H. Lundin, M. Skoglund, P. Handel // IMEKO 10th Workshop on ADC Modeling and Testing: proceedings of the conference, Gdynia/Jurata, Poland, September 2005. – V. 2. – P. 567–572.

34. Lundin H. A criterion for optimizing bit-reduced post-correction of AD converters / H. Lundin, M. Skoglund, P. Handel // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements. – August 2004. – P. 1159–1166.

35. Lundin H. A framework for external dynamic compensation of AD converters / H. Lundin, M. Skoglund, P. Handel // 7th European Workshop on ADC Modeling and Testing : proceedings of the conference, Prague, Czech Republic. – June 2002. – P. 135–138.

36. Lundin H. Analog-to-digital converter error correction using frequency selective tables / H. Lundin, T. Andersson, M. Skoglund, P. Handel // Radio Vetenskap och Kommunikation (RVK) : proceedings of the conference, Stockholm, Sweden. – June 2002. — P. 487–490.

37. Быстродействующие интегральные микросхемы ЦАП и АЦП и измерение их параметров / А.-Й. К. Марцинкявичюс, Э.-А. К. Багданскис, Р. Л. Пошюнас [и др.] ; под ред. А.-Й. К. Марцинкявичюса, Э.-А. К. Багданскиса. – М. : Радио и связь, 1988. – 224 с.

38. Микросхемы памяти, ЦАП и АЦП : справочник / О. Н. Лебедев, А.-Й. К. Марцинкявичюс, Э.-А. К. Багданскис [и др.]. – 2-е изд., стереотип. – М. : КУБК-а, 1996. – 384 с.

39. Островерхов В. В. Динамические характеристики АЦП и методы их определения / В. В. Островерхов, В. В. Павлов, А. А. Фремке // Измерительная техника. – 1979. – № 4. – С. 22–25.

40. Островерхов В. В. Определение динамических погрешностей АЦП адаптивным методом / В. В. Островерхов, В. В. Павлов // Проблемы создания преобразователей формы информации: материалы IX Всесоюз. симп. – К. : Наукова думка, 1980, ч.2. – С. 57–61.

41. Островерхов В. В. Автоматизация определения динамической погрешности аналого-цифровых преобразователей / В. В. Островерхов, В. В. Павлов // Методы и средства аналого-цифрового преобразования параметров электрических сигналов и цепей : тез. докл. II Всесоюзная конференция. – Пенза : ЦНТИ, 1981. – С. 133–135.

42. Островерхов В. В. Динамические погрешности аналого-цифровых преобразователей / В. В. Островерхов. – Л. : Энергия, 1975. – 176 с.

43. Imran A. A 50-MS/s (35 mW) to 1-kS/s (15 μ W) Power Scaleable 10-bit Pipelined ADC Using Rapid Power-On Opamps and Minimal Bias Current Variation / Imran Ahmed, David A. Johns // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2005. – V. 40, No. 12. – P. 2446–2455.

44. Balestrieri E. A state of the art on ADC error compensation methods / E. Balestrieri, P. Daponte, S. Rapuano // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements. – August 2005. – P. 1388–1394.

45. Dent A. C. Linearization of analog-to-digital converters / A. C. Dent, C. F. N. Cowan // IEEE Transactions on Circuits and Systems – June 1990. – P. 729–737.

46. Никамин В. А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи: справочник / В. А. Никамин. – СПб. : КОРОНА принт; М. : Альтекс-А, 2003. – 224 с.

47. Reeder R. Pushing the state of the Art with Multichannel A/D Converters / R. Reeder, M. Looney, J. Hand // Analog Dialogue. – 2005. – № 5. – P. 3–6.

48. McNeill J. «Split ADC» Architecture for Deterministic digital background Calibration of a 16-bit 1-MS/s ADC / John McNeill, Michael C. W. Coln, Brian J. Larivee // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2005. – V. 40, No. 12. – P. 2437–2445.

49. Волович Г. И. Микросхемы АЦП и ЦАП : справочник / Г. И. Волович, В. Б. Ежов ; отв. ред. Т. Е. Брод. – М. : Додэка-XXI, 2005. – 432 с.

50. Мерзликин С. Сверхбыстродействующие АЦП: Особенности архитектуры / С. Мерзликин // Электроника: НТБ. – 2008. – № 1. – С. 30–33.

51. Дорофеев П. Современные быстродействующие АЦП с большим динамическим диапазоном / П. Дорофеев, П. Руднев // Электроника: НТБ. – 2006. – №4. – С. 23–25.

52. Козак В. Прецизионные аналого-цифровые преобразователи / В. Козак // Электроника: НТБ. – 2006. – № 4. – С. 35–37.

53. Yu-Wei Lin A 1-GS/s FFT/IFFT Processor for UWB applications / Yu-Wei Lin, Hsuan-Yu Liu, Chen-Yi Lee // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2005. – V. 40, No. 8. – P. 1726–1734.

54. A 106-dB SNR Hybrid Oversampling analog-to-Digital Converter for Digital Audio / Khiem Nguyen, Robert Adams, Karl Sweetland, Huaijin Chen // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2005. – V. 40, No. 12. – P. 2408–2415.

55. Shabra A. Oversampled Pipeline A/D Converters With Mismatch Shaping / Ayman Shabra, Hae-Seung Lee // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2002. – V. 37, No. 5. – P. 566–577.

56. Слюсар В. Суперскоростные АЦП и ЦАП. Новые игроки на рынке / В. Слюсар // Электроника: НТБ. – 2003. – № 6. – С. 18–20.

57. Ридер Р. Особенности проектирования многоканальных АЦП / Р. Ридер, М. Лунней, Дж. Хенд // Электронные компоненты и системы. – 2006. – № 6. – С. 3–6.

58. Динамические параметры аналого-цифровых преобразователей и методы их измерений / П. И. Руднев, Б. А. Хаджи, В. Ю. Чернышев, С. Н. Шилов // Радиотехника и электроника. – 1993. – № 10. – С. 1868–1876.

59. Аминев А. М. Методы и средства контроля динамических параметров быстродействующих АЦП / А. М. Аминев, Г. Д. Бахтиаров, А. Л. Тимофеев // Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – № 4. – С. 36–55.

60. Брагин А. А. Основы метрологического обеспечения аналого-цифровых преобразователей электрических сигналов / А. А. Брагин, А. Л. Семенюк. – М. : Изд.-во стандартов, 1989. – 164 с.

61. Гитис Э. И. Аналого-цифровые преобразователи : учеб. пособие для вузов / Э. И. Гитис, Е. А. Пискулов. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 360 с.

62. Гельман М. М. Процессоры аналоговых сигналов и АЦП для информационно-измерительных систем / М. М. Гельман // Научные приборы. – 1983. – № 29. – С. 3–12.

63. Бахтиаров Г. Д. Аналого-цифровые преобразователи / Г. Д. Бахтиаров, В. В. Малинин, В. П. Школин ; под ред. Г. Д. Бахтиарова – М. : Советское радио, 1980. – 280 с.

64. Загурский В. Я. Метод исследования нелинейности аналого-цифровых преобразователей в динамике / В. Я. Загурский, Н. Я. Семенова // Измерительная техника. – 1989. – № 9. – С. 3–4.

65. Загурский В. Я. Исследование нелинейности аналого-цифровых устройств / В. Я. Загурский, Н. Я. Семенова // Методы и средства преобразования информации. – 1989. – № 9. – С. 80–93.

66. Дорофеев П. Современные быстродействующие АЦП с большим динамическим диапазоном / П. Дорофеев, П. Руднев // Электроника. – 2006. – № 4. – С. 23–25.

67. Хабаров Ю. А. Структурные методы построения устройств АЦП сверхбыстродействующего класса / Ю. А. Хабаров // Приборы и средства автоматизации. – 1993. – № 4. – С. 22–26.

68. Шиляев С. Особенности применения высокочастотных АЦП / С. Шиляев, О. Фомин // Электроника : НТБ. – 2008. – № 1. – С. 84–87.

69. Lundin H. On the estimation of quantizer reconstruction levels / H. Lundin, M. Skoglund, P. Handel // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference: proceedings of the conference, Ottawa, Canada, May 2005. – V. 1. – P. 144–149.

70. Giaquinto N. Detection, digital correction and global effect of A/D converters nonlinearities / N. Giaquinto, M. Savino, A. Trotta ; in editors P. Daponte and L. Michaeli, // International Workshop on ADC Modelling, Slovak Republic, May 1996. – P. 122–127.

71. Bergman D. I. Dynamic error correction of a digitizer for time domain metrology / D. I. Bergman // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, October 2004. – P. 1384–1390.

72. Using an interpolation method for noise shaping in A/D converters / P. Daponte, R. Holcer, L. Horniak [et al.] // 7th European Workshop on ADC Modeling and Testing : proceedings of the conference, Prague, Czech Republic, June 2002. – P. 147–150.

73. De Vito L. Bayesian calibration of a look-up table used for ADC error correction / L. de Vito, H. Lundin, S. Rapuano // IEEE

Instrumentation and Measurement Technology Conference: proceedings of the conference, Ottawa, Canada. – May 2005. – V. 1. – P. 293–297.

74. Hummels D. Performance improvement of all-digital wide-bandwidth receivers by linearization of ADCs and DACs / D. Hummels // Measurement. – January 2002. – P. 35–45.

75. Стальченко О. В. Швидкодійний аналого-цифровий перетворювач з компенсацією динамічних похибок / Г. Г. Бортник, О. В. Стальченко, В. А. Челоян, // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2011. – № 1. – С. 114–118.

76. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов : практический подход / Эммануил С. Айфичер, Барри У. Джервис – 2-е издание. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2004. – 992 с.

77. Моисеев В. С. Системное проектирование преобразователей информации / В. С. Моисеев – Л. : Машиностроение, Ленингр. отделение, 1982. – 255 с.

78. Стальченко О. В. Аналого-цифровий перетворювач з коригуванням похибок на основі фазо-площинної матриці / Г. Бортник, С. Бортник, О. Стальченко // 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.

79. Стальченко О. В. 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.

80. Irons F. H. Improved compensation for analog-to-digital converters / F. H. Irons, D. M. Hummels, S. P. Kennedy // IEEE Transactions on Circuits and Systems. – August, 1991. – No. 38(8) . – P. 958–961.

81. Бортник Г. 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.

82. Tsimbinos J. Improved error-table compensation of A/D converters / J. Tsimbinos, K. V. Lever // IEE Proceedings – Circuits, Devices and Systems. – December, 1997. – P. 343–349.

83. Стальченко О. В. Оптимізація методу спектрального оцінювання сигналів на коротких інтервалах часу / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, О. В. Стальченко // XIII Міжнар. науково-техн. конф. з автоматичного управління (Автоматика-2006) : тези доповідей – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – С. 27.

84. Giaquinto N. Testing and optimizing ADC performance: A probabilistic approach / N. Giaquinto, M. Savino, A. Trotta // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, April 1996. – P. 621–626.

85. Walden R. H. Analog-to digital converter survey and analysis / R. H. Walden // IEEE Journal on Selected Areas in Communication. – April 1999. – P. 539–550.

86. Carbone P. Statistical efficiency of the ADC sinewave histogram test / P. Carbone, E. Nunzi, D. Petri // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, 2002. – P. 849–852.

87. Лайонс Ричард. Цифровая обработка сигналов : / Ричард Лайонс. – 2-е издание. – М. : Бином-Пресс, 2006. – 656 с.

88. Гольденберг Л. М. Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие для вузов / Л. М. Гольденберг, Б. Д. Матюшкин, М. Н. Поляк. – 2-изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1990. – 256 с.

89. Бортник Г. Г. Методи та засоби контролю динамічних параметрів аналого-цифрових перетворювачів / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак, О. А. Семенюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1997. – № 2. – С. 19–28.

90. Stalchenko O. 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.

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

92. Градштейн И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – 4-е изд. – М. : Физматлит, 1963. – 1100 с.

93. Стальченко О. В. Цифровий метод спектрального оцінювання випадкових сигналів / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, О. В. Стальченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 2 – С. 108–114.

94. Загурский В. Я. Использование статистического метода контроля аналого-цифровых преобразователей для расчета динамических погрешностей в спектральной области / В. Я. Загурский, Н. Я. Семенова // Автомат. и вычисл. техн. – 1992. – № 6. – С. 38–44.

95. Moschitta A. Statistical performance of Gaussian ADC histogram test / A. Moschitta, P. Carbone, D. Petri // 8th International Workshop on ADC Modeling and Testing : proceedings of the conference, Perugia, Italy, September 2003. – P. 213–217.

96. Стальченко О. В. Спектральний метод аналізу сигналів з використанням вейвлет-перетворень / Г. Бортник, О. Стальченко // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи: матеріали Міжнар. науково-технічної конф., Київ, 10–16 березня 2014 р. – 2014. – С. 27.

97. Ахмед Н. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов : пер. с англ. / Н. Ахмед, К.Р. Рао. – М. : Связь, 1980. – 248 с.

98. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / Баскаков С. И. – 3-е изд. – М. : Высшая школа, 2000. – 462 с.

99. Бабак В. П. Обробка сигналів : підручник / В. П. Бабак, В. С. Хандецький, Е. Шрюфер. – К. : Либідь, 1996. – 392 с.

100. Стальченко О. В. Аналого-цифровий тракт комп'ютерних систем з цифровим обробленням високочастотних сигналів / Г. Г. Бортник, О. В. Стальченко, О. І. Паламарчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 2 – С. 74–78.

101. Стальченко О. В. Пристрій аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, О. В. Стальченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – № 1 – С. 102–105.

102. Стальченко О. Аналіз ефективності аналого-цифрового перетворення сигналів у радіотехнічних комплексах спеціального призначення / Г. Бортник, В. Костецький, О. Стальченко // Сучасні проблеми радіотехніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2011) : матер. V міжнар. наук.-техн. конф., Вінниця : ВНТУ, 2011. – С. 13, 14.

103. Стальченко О. В. Метод оцінювання фазового дрижання в комп'ютерних і телекомунікаційних мережах / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, О. В. Стальченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – № 2 – С. 79–82.

104. Стальченко О. В. Цифровий скремблер групового сигналу багатоканальних систем зв'язку / Г. Бортник, В. Челоян, О. Стальченко // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації: матеріали першої Міжнар. науково-технічної конф., 15–17 трав. 2007 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – С. 121–122

105. Птачек М. Цифровое телевидение. Теория и техника / М. Птачек. – М. : Радио и связь, 1990. – 528 с.

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

107. Волощук Ю. І. Сигнали та процеси у радіотехніці : підручник для студентів вищих навчальних закладів, Т. 2 / Ю. І. Волощук – Харків: Компанія СМІТ, 2003. – 444 с.

108. Carbone P. Perfomance of stochastic and deterministic dithered quantizers / P. Carbone, D. Petri // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, April 2000. – P. 337–340.

109. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1982. – 624 с.

110. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Левин Б. Р. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1989. – 656 с.

111. 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.

112. Бортник Г. Г. Методи та засоби аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів : монографія / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак, Н. О. Пунченко. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 147 с.

113. Кичак В. М. 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.

114. Стальченко О. В. Метод аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів з додатковим шумоподібним сигналом / Г. Г. Бортник, О. В. Стальченко, К. О. Боярський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 1 – С. 100–105.

115. Стальченко О. В. Аналіз ефективності аналого-цифрового перетворення сигналів у радіотехнічних комплексах / Г. Г. Бортник, М. Л. Мінов, О. В. Стальченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. – № 2 (21). – С. 12–15.

116. Пат. на корисну модель 11757 Україна, МПК Н03М 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.

117. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов / В. П. Дьяконов – М. : ДМК Пресс, 2009. – 384 с.

118. Kychak V. 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.

119. Проектирование специализированных информационно-вычислительных систем : учеб. пособие по спец. ЭВМ и АСУ / Смирнов Ю. М., Воробьев Г. Н., Потапов Е. С., Сюзев В. В.; под ред. Ю. М. Смирнова. – М. : Высш. шк., 1984. – 359 с.

120. Стальченко О. В. Високопродуктивне дискретне вейвлет-перетворення / Г. Бортник, В. Костецький, О. Стальченко // Сучасні проблеми, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування: матеріали Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 8–10 жовт. 2009 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – С. 36.

121. Стальченко О. В. Швидкий алгоритм перетворення на базі Вейвлета Хаара / Г. Бортник, О. Стальченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія : матеріали Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 19–21 трав. 2010 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – С. 104–105.

122. Бортник Г. Г. Методи та засоби обробки високочастотних сигналів: монографія / Бортник Г. Г., Кичак В. М. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. – 132 с.

123. Петровский А. А. Методы и микропроцессорные средства обработки широкополосных и быстропротекающих процессов в реальном времени / А. А. Петровський; под ред. Г. В. Римского. – Минск : Наука и техника. – 1988. – 272 с.

124. Лосев В. В. Микропроцессорные устройства обработки информации. Алгоритмы цифровой обработки / В. В. Лосев. – Минск : Высш. шк. – 1990. – 132 с.

125. Looney M. Advanced Digital Post-Processing Techniques Enhance Performance in Time-Interleaved ADC Systems / Mark Looney // Analog Dialogue. 2003. – No. 8. – P. 36–40.

126. Стальченко О. В. Метод покращення шумових характеристик систем керування з цифровим обробленням сигналів / Г. Бортник, О. Стальченко, В. Челоян // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010) : матеріали X Міжнар. науково-технічної конф.,

Вінниця, 19–21 жовтня 2010 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – С. 156.

127. Стальченко О. В. Метод підвищення завадостійкості паралельно-послідовного аналого-цифрового перетворювача / Г. Бортник, В. Челоян, О. Стальченко // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації : матеріали I Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 22–24 квіт. 2009 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – С. 182–183.

128. Мячев А. А. Интерфейсы средств вычислительной техники: справочник / А. А. Мячев. – М. : Радио и связь, 1993. – 352 с.

129. Гук М. Аппаратные интерфейсы ПК. Энциклопедия / М. Гук. – СПб. : Питер, 2003. – 528 с.

130. Стальченко О. В. Метод оцінювання основних параметрів фазового дрижання в системах передавання даних / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, О. В. Стальченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 6 – С. 97–101.

131. Стальченко О. В. Дослідження джитеру в складних телекомунікаційних мережах / М. В. Васильківський, О. В. Стальченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 2 – С. 86–89.

132. Стальченко О. В. Методи оцінювання фазового дрижання сигналів у цифрових трактах / Бортник Г. Г., Васильківський М. В., Стальченко О. В. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : матеріали Міжнар. науково-технічної конф., м. Одеса, 5–10 черв. 2015 р. Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2015. – С. 116.

133. Стальченко О. В. Аналіз впливу апертурного часу на динамічні параметри швидкодійних аналого-цифрових перетворювачів / С. Бортник, О. Стальченко // Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПМРТП-2005) : матеріали I Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 2–5 червня. 2005 р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – С. 49–50.

134. Пат. на корисну модель 35500 Україна, МПК Н03М 1/12. Пристрій для аналого-цифрового перетворення / Бортник Г. Г., Борт-

ник 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.

135. Патент на корисну модель 35547. Україна, МПК Н03М 1/18. Пристрій для аналого-цифрового перетворення / Бортник Г. Г., Мінов М. Л., Пунченко Н. О., Стальченко О. В. ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200804872; заявл. 15.04.2008; опубл. 25.09.2008, Бюл. № 18. – 3 с.

136. Алексеев В. А. Прогнозирование точности аналого-цифровых преобразователей на ранних этапах проектирования / В. А. Алексеев, О. В. Михарева // Радиотехника. – 2008. – № 155. – С. 330–334.

137. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко – СПб. : Питер, 2003. – 604 с.

138. Современный подход к моделированию АЦП в телекоммуникационных устройствах / К. Эдельман, Б. Брэннон, С. Даунинг, Т. МакЛеод // Электроника : НТБ. – 2007. – № 2. – С. 112–114.

139. Salkintzis A. K. ADC and DSP challenges in the development of software radio base stations / A. K. Salkintzis, H. Nie, P. T. Mathiopoulos // IEEE Personal Communications Magazine, August 1999. – P. 47–55.

140. Амелина М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8 / М. А. Амелина, С. А. Амелин – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 466 с.

141. The VSM Advantage. – Режим доступа до публікації: http://www.labcenter.com/products/vsm_overview.cfm

142. Хернитер М. Е. Multisim. Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств / М. Е. Хернитер – М. : ДМК Пресс, 2006. – 492 с.

143. Gao X. M. Modeling the harmonic distortion of analog-to-digital converter using Volterra series / X. M. Gao, S. Sun // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference : proceedings of the conference, IMTC/1994, May 1994. – V. 2. – P. 911–913.

144. Analog to Digital Converters. – Режим доступа до публікації: <http://www.analog.com/en/analog-to-digital-onverters/products/index.html>

145. Браннон Б. Апертурная неопределенность и рабочие характеристики АЦП / Брэд Браннон, Ален Барлогу // Электроника : НТБ. – 2006. – № 4. – С. 26–29.

146. Пат. на корисну модель 12879 Україна, МПК Н03М 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.

147. Schoukens J. Design of broadband excitation signals with a user imposed power spectrum and amplitude distribution / J. Schoukens, T. Dobrowiecki // Instrumentation and Measurement Technology Conference. IMTC/98 : proceedings of the conference, St. Paul, USA, May 1998. – Vol.2. – P. 1002–1005.

148. Патент на корисну модель 86550. Україна, МПК Н03 К 13/02. Аналого-цифровий перетворювач / Бортник Г. Г., Васильківський М. В., Стальченко О. В.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200804872; заявл. 15.04.2013 ; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1. – 3 с.

149. Бортник Г. Цифровий панорамний аналізатор спектра / Г. Бортник, С. Бортник, В. Костецький // 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.

150. Кичак В. М. Методи реалізації швидкодіючих засобів цифрової обробки сигналів / В. М. Кичак, Г. Г. Бортник, В. В. Ролінський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – № 4. – С. 87–91.

151. Патент на корисну модель 35545 Україна, МПК Н03М 1/18. Пристрій для аналого-цифрового перетворення / Бортник Г. Г., Пунченко Н. О., Стальченко О. В. ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200804869; заявл. 15.04.2008; опубл. 25.09.2008, Бюл. № 18. – 4 с.

152. Патент на корисну модель 89366. Україна, МПК G06G 7/00. Паралельно-послідовний аналого-цифровий перетворювач / Г. Г. Бортник, Кичак В. В., Стальченко О. В.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 201303341; заявл. 19.03.2013; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8. – 3 с.

153. Федорков Б. Г. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение / Б. Г. Федорков, В. А. Телец. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

154. Перебаскин А. В. Отечественные микросхемы / А. В. Перебаскин – М. : Додэка-XXI, 2004. – 400 с.

155. Патент на корисну модель 89367. Україна, МПК НОЗ К 5/00. Паралельний аналого-цифровий перетворювач / Бортник Г. Г., Васильківський М. В., Стальченко О. В.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет.– № 201303342; заявл. 19.03.2013; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8. – 3 с.

156. Стешенко В. Б. ПЛИС фирмы Altera: элементна база, система проектирования и языки описания аппаратуры / Стешенко В. Б. – 3-е изд. – М. : Додэка-XXI, 2007. – 576 с.

Наукове видання

Бортник Геннадій Григорович
Кичак Василь Мартинович
Стальченко Олександр Володимирович

**АНАЛОГО-ЦИФРОВІ ТРАКТИ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ
З ЦИФРОВИМ ОБРОБЛЕННЯМ
ВИСОКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Г. Бортником

Підписано до друку 28.04.2016 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,08.
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2016-11

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.

publish.vntu.edu.ua; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.