

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

На правах рукопису

**СТАЛЬЧЕНКО ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 004.3

**АНАЛОГО-ЦИФРОВІ ТРАКТИ ПЕРЕТВОРЕННЯ  
ВИСОКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ З КОРИГУВАННЯМ  
НЕЛІНІЙНОСТІ**

Спеціальність 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Науковий керівник  
Бортник Геннадій Григорович  
кандидат техн. наук, доцент

Вінниця – 2015

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ АЦТ ВИСОКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ З КОРИГУВАННЯМ НЕЛІНІЙНОСТІ.....	16
1.1 Аналіз нелінійності АЦТ ВЧ-сигналів.....	16
1.2 Аналіз особливостей визначення нелінійності АЦТ.....	21
1.3 Аналіз методів коригування нелінійності в швидкодійних АЦП ВЧ- сигналів.....	26
1.4 Аналіз принципів цифрового коригування нелінійності АЦТ.....	36
1.5 Вибір напрямків і постановка задачі досліджень.....	39
1.6 Висновки до розділу 1.....	42
РОЗДІЛ 2 МЕТОД ЦИФРОВОГО КОРИГУВАННЯ НЕЛІНІЙНОСТІ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ТРАКТУ.....	44
2.1 Принципи цифрового коригування нелінійності АЦТ.....	44
2.2 Розробка математичної моделі нелінійності аналого-цифрового тракту в базисі дискретних функцій Фур'є.....	49
2.3 Гістограмне оцінювання диференціальної нелінійності АЦТ.....	55
2.4 Визначення нелінійності АЦТ на базі ДПУ.....	59
2.5 Аналіз ефективності методу коригування нелінійності АЦТ.....	68
2.6 Аналіз нелінійності тестового сигналу АЦТ.....	74
2.7 Висновки до розділу 2.....	77
РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ ОСНОВНИХ АПАРАТНИХ І ПРОГРАМНИХ СКЛАДОВИХ АЦТ З КОРИГУВАННЯМ НЕЛІНІЙНОСТІ.....	80
3.1 Розробка модифікованого методу аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів з додаванням додаткового шумоподібного сигналу.....	80
3.2 Розробка базового АЦП аналого-цифрового тракту.....	91
3.3 Розробка генератора тестових сигналів.....	96

3.4 Синтез алгоритму цифрового оброблення сигналів АЦТ у базисі функцій Уолша.....	102
3.5 Синтез алгоритму швидкого перетворення спектрів сигналу АЦТ з базису Уолша в базис Фур'є.....	107
3.6 Висновки до розділу 3.....	113
<b>РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ВЧ-СИГНАЛІВ В АЦТ.....</b>	<b>116</b>
4.1 Інженерна методика побудови АЦТ комп'ютерних систем цифрового оброблення ВЧ-сигналів.....	116
4.2 Розробка структурних схем АЦТ.....	124
4.3 Комп'ютерне моделювання АЦТ перетворення ВЧ-сигналів.....	134
4.4 Результати експериментальних досліджень.....	144
4.5 Висновки до розділу 4 .....	150
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>152</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>155</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>174</b>
Додаток А. Комп'ютерна модель АЦТ з 12-розрядним АЦП, що реалізує метод аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів з додаванням шуму.....	175
Додаток Б Комп'ютерна модель АЦТ з 12-розрядним АЦП, що реалізує метод аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів з додаванням шуму.....	176
Додаток В Зовнішній вигляд макета АЦТ з цифровим коригуванням нелінійності.....	177
Додаток Г Зовнішній вигляд макета АЦТ з додатковим шумовим сигналом.....	178
Додаток Д Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	179

## ВСТУП

**Актуальність теми.** 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 швидкодією, 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 займатися вітчизняні наукові школи О.Д. Азарова [1-6], А.І. Кондалєва [7-10]. Загальні принципи побудови АЦТ ВЧ-сигналів досліджувались науковою школою В.Б. Смолова [11-13]. Розробленням 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 Багданскіс Е.-А.К. та Марцинкявічус А.-Й.К. [37, 38]. Слід відзначити також дослідження Островерхова В.В., які дозволили розкрити механізм обмеження динамічного діапазону АЦТ [39-42].

Значна кількість продукції світових лідерів аналого-цифрової техніки фірм Analog Devices, Burr-Brown, Maxim, Dattel, 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, призводять 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, яким присвячена дисертаційна робота, є актуальною науковою задачею, розв'язання якої має важливе значення для науки та виробництва, оскільки сприяє вдосконаленню відомих і появі нових АЦТ ВЧ-сигналів з широким динамічним діапазоном.

**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:

а) держбюджетної науково-дослідної роботи “Розробка теорії та методології цифрового оброблення радіосигналів у реальному часі” (№ державної реєстрації 0111U001111);

б) держбюджетної науково-дослідної роботи „Розробка інформаційних пристроїв і засобів оцінювання джитеру на базі принципів нечіткого іммітанса та цифрового оброблення сигналів“ (№ державної реєстрації 0114U003463);

в) 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 розширення динамічного діапазону аналого-цифрових трактів комп'ютерних систем оброблення високочастотних сигналів шляхом коригування нелінійності характеристики перетворення трактів.

Для досягнення поставленої мети розв'язуються такі задачі:

- аналіз сучасного стану розробок АЦТ високочастотних сигналів з коригуванням нелінійності, аналіз шляхів покращення динамічного діапазону тракту аналого-цифрового перетворення сигналів;

- удосконалення математичної моделі нелінійності аналого-цифрового тракту комп'ютерних систем цифрового оброблення ВЧ-сигналів, яка враховує вплив кожного рівня квантування на загальну нелінійність тракту;

- розроблення методу цифрового коригування нелінійності аналого-цифрового тракту високочастотних сигналів, у рамках якого формування коригувальних членів базується на обробленні вибірок тестового сигналу у часовому та частотному поданні;

- аналіз ефективності методу цифрового коригування нелінійності АЦТ залежно від параметрів вхідних сигналів та нелінійності характеристики перетворення АЦТ;

- розроблення модифікованого методу аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів з додаванням додаткового шумоподібного сигналу та аналіз його ефективності;

- синтез та аналіз основних апаратних і програмних складових АЦТ перетворення ВЧ-сигналів з коригуванням нелінійності;

- розроблення інженерної методики побудови АЦТ перетворення ВЧ-сигналів з коригуванням нелінійності, а також розроблення структур та алгоритму калібрування АЦТ з розширеним динамічним діапазоном;

- комп'ютерне моделювання запропонованих АЦТ перетворення ВЧ-сигналів з коригуванням нелінійності;

- експериментальні дослідження макетних зразків АЦТ перетворення ВЧ-сигналів з коригуванням нелінійності.

**Об'єктом досліджень** є процеси оброблення високочастотних сигналів в аналого-цифрових трактах комп'ютерних систем.

**Предметом досліджень** є методи та засоби розширення динамічного діапазону аналого-цифрових трактів комп'ютерних систем цифрового оброблення ВЧ-сигналів.

**Методи дослідження** базуються на використанні: теорії аналого-цифрового перетворення та теорії сигналів для аналізу нелінійності аналого-цифрових трактів, теорії випадкових процесів для аналізу та синтезу псевдовипадкових тестових сигналів; теорії похибок та теорії цифрового оброблення сигналів для розроблення методів калібрування та дослідження динамічного діапазону АЦТ; евристичного синтезу для розробки структур АЦТ перетворення ВЧ-сигналів з коригуванням нелінійності; комп'ютерного моделювання для перевірки отриманих теоретичних положень.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у тому що:

- уперше запропоновано метод цифрового коригування нелінійності аналого-цифрового тракту високочастотних сигналів, який, на відміну від відомих, використовує для визначення коригувальних поправок гістограмне оцінювання диференціальної нелінійності з подальшим обробленням отриманих послідовностей у базисі частотно-впорядкованих функцій Уолша, а це створює умови для розширення динамічного діапазону АЦТ у режимі коригування;

- удосконалено математичну модель нелінійності аналого-цифрового тракту комп'ютерних систем цифрового оброблення ВЧ-сигналів, яка, на відміну від відомих, за рахунок використання базису дискретних функцій Фур'є, враховує вплив кожного рівня квантування на загальну розрядну нелінійність тракту, що зменшує масив оброблювальних даних до рівня окремих вихідних розрядів АЦТ і відповідно спрощує процес визначення реального динамічного діапазону АЦТ та підвищує наочність оцінювання рівня гармонічних спотворень сигналу у досліджуваному тракті;

- отримано нові аналітичні вирази для оцінювання динамічного діапазону АЦТ з коригуванням, які, на відміну від відомих, враховують потужність завад, що є наслідком нелінійності характеристики перетворення, параметри вхідних сигналів і точність формування поправок, що дозволяє визначити ефективність методу цифрового коригування нелінійності АЦТ ВЧ-сигналів та обрати необхідний режим калібрування тракту;

- удосконалено метод аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів з додаванням додаткового шумоподібного сигналу, який на відміну від існуючих, використовує як додатковий вузькосмуговий шум, спектр частот якого знаходиться за межами частотного діапазону корисного сигналу і амплітуда цього шумового сигналу перевищує значення кроку квантування АЦП, а в цифровому вигляді цей же додатковий шум віднімається від вихідного сигналу АЦП, що дає ефект розширення динамічного діапазону АЦП і підвищує ефективність коригування нелінійності ХП усього АЦТ.

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

- розробити інженерну методику побудови аналого-цифрових трактів перетворення високочастотних сигналів, яка дала можливість створювати комп'ютерні системи цифрового оброблення ВЧ-сигналів з широким динамічним діапазоном;

- розробити структуру базового АЦП паралельного типу, аналіз ефективності якого згідно запровадженого узагальненого критерію дозволив стверджувати, що спостерігається покращення динамічного діапазону перетворювача при збільшенні числа розрядів, водночас апаратурна складність АЦП залишається на достатньо прийнятному рівні;

- розробити на основі таблично-алгоритмічного методу побудови структуру цифро-аналогового генератора тестових сигналів АЦТ, реалізація якого на базі принципу кусково-лінійної апроксимації при синтезі сигналу дозволяє ліквідувати основну перешкоду на шляху використання стандартних ПЗП у структурі генератора за рахунок різкого зменшення обсягу необхідної пам'яті;

- розробити структуру аналого-цифрового тракту перетворення високочастотних сигналів, в якому застосовуються метод цифрового коригування розрядної нелінійності АЦТ, а також розробити блок-схему алгоритму калібрування ХП АЦТ, при цьому досягається широкий динамічний діапазон тракту;

- розробити структуру аналого-цифрового тракту перетворення ВЧ-сигналів на базі модифікованого методу аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів з додаванням додаткового шумоподібного сигналу, що характеризується широким динамічним діапазоном;

- синтезувати алгоритм взаємних спектральних перетворень Уолша-Фур'є, уникнувши при цьому реалізації алгоритму ШПФ для вихідних сигналів АЦТ, що дало можливість підвищити продуктивність оброблення ВЧ-сигналів;

- створити діючі макетні зразки аналого-цифрових трактів перетворення ВЧ-сигналів з використанням базових ВІС АЦП фірм Venta та Analog Devices, а саме: 14-розрядного АЦТ з цифровим коригуванням нелінійності на базі ВІС типу 1107ПВ5А і 12-розрядного АЦТ з додатковим вхідним шумом на базі ВІС типу AD9230.

Розроблені методи та пристрої впроваджено у ПАТ “Маяк” (акт впровадження від 8.06.2015) і у Вінницькому центрі технічного обслуговування та експлуатації ТОВ “Атраком” (акт впровадження від 5.06.2015). 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 у телекомунікаційних системах”, “Інформаційно-вимірювальні системи в телекомунікаціях”, “Телекомунікаційні системи передачі” 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: [75], сформулював шляхи покращення динамічного діапазону швидкодійних АЦП; [78], запропонував вираз для розрядної нелінійності АЦТ; [79], ідея цифрового коригування нелінійності аналого-цифрового тракту високочастотних сигналів і табличного формування коригувальних поправок; [83], ідея оцінювання нелінійностей АЦТ шляхом використання методів цифрового спектрального аналізу; [90], здійснив оцінку спектра сигналу з виходу АЦТ у базисі функцій Фур’є; [91], запропонував математичну модель нелінійності АЦП у базисі дискретних функцій Фур’є; [93], запропонував процедуру багатоетапного оброблення вибірок сигналу АЦТ; [96], проаналізував помилки суперпозиції при дослідженні спектрів вихідних сигналів АЦТ на базі ДПФ; [100], запропонував для визначення коригувальних поправок АЦТ ВЧ-сигналів здійснювати гістограмне оцінювання диференціальної нелінійності з подальшим обробленням

отриманих послідовностей у базисі частотно-впорядкованих функцій Уолша; [101], запропонував аналітичні вирази для оцінювання динамічного діапазону АЦТ перетворення високочастотних сигналів з коригуванням нелінійності; [102], запропонував вираз для оцінки ефективності аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів; [103], здійснив обґрунтування та вибір тестового сигналу для трактів комп'ютерних мереж; [104], ідея підвищення граничної пропускної здатності АЦТ; [106], запропонував режими дискретизації вузькосмугових сигналів в АЦТ перетворення ВЧ-сигналів; [114], ідея використання в АЦП ВЧ-сигналів додаткового вузькосмугового шуму, спектр частот якого знаходиться за межами частотного діапазону корисного сигналу і амплітуда цього шумового сигналу перевищує значення кроку квантування АЦП; [115], запропонував вирази для оцінювання ефективності АЦТ перетворення високочастотних сигналів; [116], ідея введення в структуру АЦП багатопорогового компаратора; [120], виконав оцінку обсягу обчислень коефіцієнтів дискретного перетворення сигналів; [121], запропонував критерій ефективності алгоритмів цифрового оброблення ВЧ-сигналів; [126], запропонував вираз для визначення чутливості аналогової частини тракту систем керування з цифровим обробленням сигналів; [127], запропонував вираз для визначення рівня шумів у процесі аналого-цифрового перетворення; [130], ідея спектрального оцінювання параметрів фазового дрижання високочастотних сигналів в АЦТ систем передавання даних; [131], запропонував принцип апаратно-програмної реалізації керувального блоку АЦТ високочастотних сигналів; [132], ідея первинного цифрового оброблення ВЧ-сигналів в АЦТ; [133], проаналізував вплив апертурного часу на динамічний діапазон швидкодійних АЦП; [134], ідея збереження поправок в ПЗП скоригованих кодових символів; [135], ідея формування цифрового шумового сигналу, що подається на одну з шин цифрового віднімача; [146], ідея використання на вході АЦП аналогового ключа та підсилювача; [148], ідея використання на виході АЦП буферних регістрів; [151], ідея використання в АЦТ лінійки малорозрядних АЦП; [152], ідея двократного перетворення

сигналів одним паралельним АЦП; [155], ідея використання двох аналогових ключів, які змінюють послідовне зміщення вхідного сигналу АЦП.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на таких науково-технічних конференціях: I Міжнародній науково-технічній конференції „Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування“ (м. Вінниця, 2005 р.), 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.), Міжнародній науково-технічній конференції „Modern problems of radio engineering, 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 „Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія“ (м. Вінниця, 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), Міжнародній науково-технічній конференції „Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи“ (м. Київ, 2014 р.), XIV Міжнародній науково-технічній конференції „Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах“ (м. Одеса, 2015).

**Публікації.** За підсумками наукових досліджень опубліковано 32 наукові праці, включаючи 12 статей в українських наукових журналах, які входять до переліку Міністерства освіти і науки України, як фахові для спеціальності

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти, з них 6 статей – входять до науково-метричних баз даних, 12 публікацій – у збірниках праць Міжнародних науково-технічних конференцій, одна з них входить до науково-метричної бази «Scopus» та 8 патентів України на корисну модель.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота містить вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг дисертації – 181 сторінка, з яких основний зміст викладено на 143 сторінках, містить 55 рисунків та 6 таблиць. Список використаних джерел складається зі 156 найменувань. Додатки містять результати експериментальних досліджень та документи, що підтверджують впровадження результатів роботи.

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету та задачі досліджень, відображено основні наукові результати та їх практичне значення.

Перший розділ присвячено аналіз напрямків розвитку АЦТ високочастотних сигналів з коригуванням нелінійності. 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. Здійснюється постановка задачі покращення динамічного діапазону тракту аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів.

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

Четвертий розділ присвячено розробці інженерної методики 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. Виконано розробку 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.

У висновках сформульовано основні результати досліджень.

У додатках наведено результати експериментальних досліджень та документи, що підтверджують впровадження результатів роботи.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Азаров О.Д. Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі надлишкових систем числення з ваговою надлишковістю: монографія / Азаров О.Д. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 232 с. – ISBN 966-641-354-6.
2. Азаров О.Д. Конвеєрні аналого-цифрові перетворювачі з ваговою надлишковістю: монографія / Азаров О.Д., Шапошніков О.В., Захарченко С.М. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 157 с. – ISBN 966-641-165-2.
3. Крупельницький Л.В. Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів: монографія / Крупельницький Л.В., Азаров О.Д.; під. заг. ред. О.Д. Азарова. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005 – 167 с. – ISBN 966-641-126-1.
4. Азаров О.Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення: монографія / Азаров О.Д. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004 – 260 с. – ISBN 966-641-086-9.
5. Азаров О.Д. Високолінійні порозрядні АЦП з ваговою надлишковістю для систем реєстрації і оброблення сигналів: монографія / Азаров О.Д., Архипчук О.А., Захарченко С.М. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 125 с. – ISBN 966-641-112-1.
6. Азаров О.Д. Аналого-цифрові інтерфейси ЕОМ: навч. посіб. / Азаров О.Д., Марценюк В.П., Біліченко Н.О. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 178 с. ISBN 966-641-176-8.
7. Преобразователи формы информации для малых ЭВМ / Кондалев А.И., Багацкий В.А., Романов В.А., Фабричев В.А. – 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. Грешицев, 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. – ISSN 1817-2369.

11. Смолов В.Б. Микроэлектронные цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи информации / Смолов В.Б., Угрюмов Е.П., Шмидт В.К.; под. ред. В.Б. Смолова. – Л.: Энергия, 1976. – 336 с.

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

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. Смолова. – 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. – ISBN 5-03-003316-5.

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: пер. с англ. / Уолт Кестер. – М.: Техносфера, 2007. – 1016 с. – ISBN 978-5-94836-146-8.

20. Кестер У. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов: пер. с англ. / Уолт Кестер. – М.: Техносфера, 2010. – 328 с. – ISBN 978-5-94836-243-4.

21. Кестер У. Входной шум АЦП: всегда ли нужно с ним бороться? / У. Кестер // Электронные компоненты и системы. – 2006. – №5. – С. 3–8. – ISSN 1817-2369.

22. Кестер У. Как правильно выбрать АЦП? / У. Кестер // Электронные компоненты и системы. – 2005. – №12. – С. 12–18. – ISSN 1817-2369.

23. Kester W. DSP Test techniques keep ADC's in check / Kester W. // EDN. – 1990. – №2. – P.133–136, 138, 140, 142. – ISSN 0012-7515.

24. Kester W. Flash ADC's provide the basis for high-speed conversion / Kester W. // EDN. – 1990. – №1. – P.101–106, 108, 110. – ISSN 0012-7515.

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. / Lundin H., Skoglund M., Handel P. // IEEE Workshop on Statistical Signal Processing: proceedings of the conference, Singapore. – August 2001. –P. 377–380. – ISBN 0-7803-7011-2.

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

34. Lundin H. A criterion for optimizing bit-reduced post-correction of AD converters / Lundin H., Skoglund M., Handel P. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements. – August 2004. – P. 1159–1166. – ISSN 0018-9456.

35. Lundin H. A framework for external dynamic compensation of AD converters / Lundin H., Skoglund M., Handel P. // 7<sup>th</sup> 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 / Lundin H., Andersson T., Skoglund M., Handel P. // 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. – ISBN 5-256-00134-5.

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. – ISBN 5-855554-102-9.

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

40. Островерхов В.В. Определение динамических погрешностей АЦП адаптивным методом / Островерхов В.В., Павлов В.В. // 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 / Островерхов В.В., Павлов В.В. // 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  $\mu$ 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. – Vol.40, No.12. – P. 2446–2455. – ISSN 0018-9200.

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. – ISSN 0018-9456.

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. – ISSN 0018-9456.

46. Никамин В.А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи: справочник / В.А. Никамин. – СПб.: КОРОНА принт; М.: Альтекс-А, 2003. – 224 с. – ISBN 5-94271-013-9.

47. Reeder R. Pushing the state of the Art with Multichannel A/D Converters / Reeder R., Looney M., Hand J. // Analog Dialogue. – 2005. – №5. – P. 3–6. – ISSN 0161-3626.

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. – Vol.40, No.12. – P. 2437–2445. – ISSN 0018-9200.

49. Волович Г.И. Микросхемы АЦП и ЦАП: справочник / Волович Г.И., Ежов В.Б.; отв. ред. Т.Е. Брод. – М.: Додэка-XXI, 2005. – 432 с. – ISBN 5-94120-091-9.

50. Мерзликин С. Сверхбыстродействующие АЦП: Особенности архитектуры / С. Мерзликин // Электроника: НТБ. – 2008. – №1. – С. 30–33. – ISSN 0132-3784.

51. Дорофеев П. Современные быстродействующие АЦП с большим динамическим диапазоном / П. Дорофеев, П. Руднев // Электроника: НТБ. – 2006. – №4. – С. 23–25. – ISSN 0132-3784.

52. Козак В. Прецизионные аналого-цифровые преобразователи / В. Козак // Электроника: НТБ. – 2006. – №4. – С. 35–37. – ISSN 0132-3784.

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. – Vol.40, No.8. – P. 1726–1734. – ISSN 0018-9200.

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. – Vol.40, No.12. – P. 2408–2415. – ISSN 0018-9200.

55. Shabra A. Oversampled Pipeline A/D Converters With Mismatch Shaping / Ayman Shabra, Hae-Seung Lee // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2002. – Vol.37, No.5. – P. 566–577. – ISSN 0018-9200.

56. Слюсар В. Суперскоростные АЦП и ЦАП. Новые игроки на рынке / В. Слюсар // Электроника: НТБ. – 2003. – №6. – С. 18–20. – ISSN 0132-3784.

57. Ридер Р. Особенности проектирования многоканальных АЦП / Р. Ридер, М. Лунней, Дж. Хенд // Электронные компоненты и системы. – 2006. – №6. – С. 3–6. – ISSN 1817-2369.

58. Динамические параметры аналого-цифровых преобразователей и методы их измерений / Руднев П.И., Хаджи Б.А., Чернышев В.Ю., Шилов С.Н. // Радиотехника и электроника. – 1993. – №10. – С.1868–1876. – ISSN 0033-8494.

59. Аминев А.М. Методы и средства контроля динамических параметров быстродействующих АЦП / Аминев А.М., Бахтиаров Г.Д., Тимофеев А.Л. // Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – №4. – С. 36–55. – ISSN 0373-2428.

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. – ISBN 5-7050-0016-2.

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 / Загурский В.Я., Семенова Н.Я. // Измерительная техника. – 1989. – №9. – С. 3–4. – ISSN 0368-1025.

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. – ISSN 2073-0004.

68. Шиляев С. Особенности применения высокочастотных АЦП / С. Шиляев, О. Фомин // Электроника: НТБ. – 2008. – №1. – С. 84–87. – ISSN 0132-3784.

69. Lundin H. On the estimation of quantizer reconstruction levels / Lundin H., Skoglund M., Handel P. // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference: proceedings of the conference, Ottawa, Canada, May 2005. – Vol.1. – P. 144–149. – ISSN 0018-9456.

70. Giaquinto N. Detection, digital correction and global effect of A/D converters nonlinearities / Giaquinto N., Savino M., Trotta A.; in Daponte P. and Michaeli L., editors // 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 // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, October 2004. – P. 1384–1390. – ISSN 0018-9456

72. Using an interpolation method for noise shaping in A/D converters / Daponte P., Holcer R., Horniak L. [et al.] // 7<sup>th</sup> 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 / De Vito L., Lundin H., Rapuano S. // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference: proceedings of the conference, Ottawa, Canada. – May 2005. – Vol.1. – P. 293–297. – ISSN 0018-9456.

74. Hummels D. Performance improvement of all-digital wide-bandwidth receivers by linearization of ADCs and DACs // Measurement. – January 2002. – P. 35–45. – ISSN 0032-4140.

75. Стальченко О.В. Швидкодієний 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. – ISSN 2219-9365.

76. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов: практический подход: пер. с англ. / Айфичер Эммануил С., Джервис Барри У. – 2-е издание. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 992 с. – ISBN 5-8459-0710-1.

77. Моисеев В.С. Системное проектирование преобразователей информации / Моисеев В.С. – 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. – ISBN 966-641-195-4.

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. – ISSN 1999-9941.

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. – 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. – ISSN 2226-9150.

82. Tsimbinos J. Improved error-table compensation of A/D converters / Tsimbinos J., Lever K.V. // IEE Proceedings – Circuits, Devices and Systems. – December, 1997. – P. 343–349. – ISSN 1350-2409.

83. Стальченко О.В. 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.

84. Giaquinto N. Testing and optimizing ADC performance: A probabilistic approach / Giaquinto N., Savino M., Trotta A. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, April 1996. – P. 621–626. – ISSN 0018-9456.

85. Walden R.H. Analog-to digital converter survey and analysis // IEEE Journal on Selected Areas in Communication. – April 1999. – P. 539–550. – ISSN 0733-8716.

86. Carbone P. Statistical efficiency of the ADC sinewave histogram test / Carbone P., Nunzi E., Petri D. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, 2002. – P. 849–852. – ISSN 0018-9456.

87. Лайонс Ричард. Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. / Ричард Лайонс. – 2-е издание. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с. – ISBN 5-9518-0149-4.

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. – ISBN 5-256-00678-9.

89. Бортник Г.Г. Методи та засоби контролю динамічних параметрів аналого-цифрових перетворювачів / Бортник Г.Г., Кичак В.М., Семенюк О.А. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1997. – №2. – С. 19–28. – ISSN 2219-9365.

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. – ISBN 978-966-553-678-9.

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. – ISSN 1997-9266.

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. – ISSN 1997-9266.

94. Загурский В.Я. Использование статистического метода контроля аналого-цифровых преобразователей для расчета динамических погрешностей в спектральной области / Загурский В.Я. Семенова Н.Я. // Автомат. и вычисл. техн. – 1992. – №6. – С. 38–44. – ISSN 0132-4160.

95. Moschitta A. Statistical performance of Gaussian ADC histogram test / Moschitta A., Carbone P., Petri D. // 8<sup>th</sup> International Workshop on ADC Modeling and Testing: proceedings of the conference, Perugia, Italy, September 2003. – P. 213–217. – ISSN 1549-8328.

96. Стальченко О.В. Спектральний метод аналізу сигналів з використанням вейвлет-перетворень / Бортник Г., Стальченко О. // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи: матеріали Міжнар. науково-технічної конф., Київ, 10–16 бер. 2014 р. – 2014. – С. 27. – ISSN 2311-4169.

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. – изд. 3-е. – М.: Высшая школа, 2000. – 462 с. – ISBN 5-06-003843-2.

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. – ISSN 2219-9365.

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. – ISSN 2219-9365.

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., м. Вінниця: ВНТУ, 2011. – С. 13, 14. – ISBN 978-966-641-411-6.

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. – ISSN 2219-9365.

104. Стальченко О.В. Цифровий скремблер групового сигналу багатоканальних систем зв'язку / Бортник Г., Челоян В., Стальченко О. // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації: матеріали першої Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 15-17 трав. 2007 р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. –С.121–122.– ISBN 978-966-641-304-1.

105. Птачек М. Цифровое телевидение. Теория и техника / М. Птачек. – М.: Радио и связь, 1990. – 528 с.– ISBN5-256-00279-1.

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. – ISSN 2219-9365.

107. Волощук Ю.І. Сигнали та процеси у радіотехніці: підручник для студентів вищих навчальних закладів, том 2 / Волощук Ю.І. – Харків: Компанія СМІТ, 2003. – 444 с. – ISBN 966-8530-05-5.

108. Carbone P. Perfomance of stochastic and deterministic dithered quantizers / Carbone P., Petri D. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, April 2000. – P. 337–340. – ISSN 0018-9456.

109. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника / Тихонов В.И. – 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. – ISBN 5-256-00264-3.

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. – ISSN 2219-9365.

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. – ISSN 2219-9365.

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. – ISSN 2219-9365.

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. – ISSN 1999-9941.

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 / Дьяконов В.П. – М.: ДМК Пресс, 2009. – 384 с. – ISBN 978-5-94074-493-1.

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

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 / Бортник Г., Костецкий В., Стальченко О. // Сучасні проблеми, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування: матеріали Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 8–10 жовт. 2009 р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – С. 36. – ISBN 966-641-195-4.

121. Стальченко О.В. Швидкий алгоритм перетворення на базі Вейвлета Хаара / Бортник Г., Стальченко О. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: матеріали Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 19-21 трав. 2010 р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – С. 104–105. – ISBN 978-966-641-356-0.

122. Бортник Г.Г. Методи та засоби обробки високочастотних сигналів: монографія / Бортник Г.Г., Кичак В.М. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. – 132 с. – ISBN 966-7199-23-1.

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. – ISBN 5-343-00260-9.

124. Лосев В.В. Микропроцессорные устройства обработки информации. Алгоритмы цифровой обработки / В.В. Лосев. – Минск: Выш.шк. – 1990. – 132 с. – ISBN 5-339-003485-5.

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. – ISSN 0161-3626.

126. Стальченко О.В. Метод покращення шумових характеристик систем керування з цифровим обробленням сигналів / Бортник Г., Стальченко О., Челоян В. // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010): матеріали X Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 19-21 жовтня 2010р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – С. 156.

127. Стальченко О.В. Метод підвищення завадостійкості паралельно-послідовного аналого-цифрового перетворювача / Бортник Г., Челоян В., Стальченко О. // 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.– ISBN 978-966-641-304-1.

128. Мячев А.А. Интерфейсы средств вычислительной техники: справочник / А.А. Мячев. – М.: Радио и связь, 1993. – 352 с. – ISBN 5-256-00990-7.

129. Гук М. Аппаратные интерфейсы ПК. Энциклопедия / М. Гук. – СПб.: Питер, 2003. – 528 с. – ISBN 5-94723-180-8.

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. – ISSN 1997-9266.

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. – ISSN 2219-9365.

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 / Бортник С., Стальченко О. // 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. – ISBN 966-641-195-4.

134. Пат. на корисну модель 35500 Україна, МПК Н03М 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.

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. – ISSN 0033-8486.

137. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / Сергиенко А.Б. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с. – ISBN 5-318-00666-3.

138. Современный подход к моделированию АЦП в телекоммуникационных устройствах / К. Эдельман, Б. Брэннон, С. Даунинг, Т. МакЛеод // Электроника: НТБ. – 2007. – №2. – С. 112–114. – ISSN 0132-3784.

139. Salkintzis A.K. ADC and DSP challenges in the development of software radio base stations / Salkintzis A.K., Nie H., Mathiopoulos P.T. // IEEE Personal Communications Magazine, August 1999. – P. 47–55. – ISSN 1070-9916.

140. Амелина М.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8 / Амелина М.А., Амелин С.А. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 466 с. ISBN 978-5-93517-339-5.

141. The VSM Advantage [Электронный ресурс]. – Режим доступа до публікації: [http://www.labcenter.com/products/vsm\\_overview.cfm](http://www.labcenter.com/products/vsm_overview.cfm)

142. Хернитер М.Е. Multisim. Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств / Хернитер М.Е. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 492 с. – ISBN 5-9706-0026-1.

143. Gao X.M. Modeling the harmonic distortion of analog-to-digital converter using Volterra series / Gao X.M., Sun S. // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference: proceedings of the conference, IMTC/1994, May 1994. – Vol.2. – P. 911–913. – ISBN 0-7803-1880-3.

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

145. Браннон Б. Апертурная неопределенность и рабочие характеристики АЦП / Брэд Браннон, Ален Барлогу // Электроника: НТБ. – 2006. – №4. – С. 26–29. – ISSN 0132-3784.

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 / Schoukens J., Dobrowiecki T. // Instrumentation and Measurement Technology Conference. IMTC/98: proceedings of the conference, St. Paul, USA, May 1998. – Vol.2. – P. 1002–1005. – ISBN 0-7803-4797-8.

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 / 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.

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. – ISSN 2219-9365.

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 / Бортник Г.Г., 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. – ISBN 5-283-01545-9.

154. Перебаскин А.В. Отечественные микросхемы / Перебаскин А.В. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. – 400 с. – ISBN 5-94120-034-X.

155. Патент на корисну модель 89367. Україна, МПК Н03 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.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. – 576 с. – ISBN 978-5-94120-112-9.