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 Гриорович

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 |
| РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ВЧ-СИГНАЛІВ В АЦТ..................................................... | 116 |
| 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 |
| ВИСНОВКИ…………………………………………………………………... | 152 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……………………………………. | 155 |
| ДОДАТКИ…………………………………………………………………….. | 174 |
| 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 |

**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

ОЗП - оперативний запам’ятовувальний пристрій

ОМР - одиниця молодшого розряду

ПЗП - постійний запам’ятовувальний пристрій

ПК - персональний комп’ютер

ПЛМ - програмована логічна матриця

ТКЗ - таблиця коригувальних значень

ХП - характеристика перетворення

ЦАП - цифроаналоговий перетворювач

ЦОС **–** цифрова обробка сигналів

ШПУ **–** швидке перетворення Уолша

ШПФ **–** швидке перетворення Фур′є

**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 займались і продовжують займатись 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, Datel, 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; еврістичного 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 використанням 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: І Міжнародній науково-технічній конференції „Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладо-будування“ (м. Вінниця, 2005 р.), ХІІІ Міжнародній науково-технічній конфе-ренції з автоматичного управління „Автоматика-2006“ (м. Вінниця, 2006 р.), ІІ Міжнародній науково-технічній конференції „Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування“ (м. Вінниця, 2006 р.), І Міжнародній науково-практичній конференції „Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації“ (м. Вінниця, 2007 р.), Міжнародній науково-технічній конференції „Modern problems of radio engineerings, telecommunications and computer science (TCSET’2008)“ (м. Львів, 2008), ІІ Міжнародній науково-практичній конференції „Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації“ (м. Вінниця, 2009 р.), ІV 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), Х 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.), ХІV 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 нелінійностіАЦТ на базі дискретного перетворення Уолша. Виконано аналіз ефективноті 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.

**ВИСНОВКИ**

У дисертаційній роботі виконано дослідження, які присвячено розширенню динамічного діапазону АЦТ ВЧ-сигналів комп’ютерних систем шляхом коригування нелінійності характеристики перетворення тракту.

Основні результати досліджень такі:

1. Виконано аналіз принципів розширення динамічного діапазону АЦТ ВЧ-сигналів. Зроблено висновок, що на сучасному етапі розвитку теорії та техніки перетворення форми інформації актуальним і перспективним є створення нових методів і засобів, які базуються на методології цифрового коригування нелінійності АЦП і всього АЦТ. Цифрове коригування нелінійності полягає у введені в цифрову частину тракту проходження сигналу штучної нелінійності, при якій загальна ХП нелінійного АЦТ і коригувального нелінійного елемента стає більш лінійною.

2. 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.

3. Запропоновано новий метод цифрового коригування нелінійності аналого-цифрового тракту ВЧ-сигналів, який, на відміну від відомих, використовує оброблення вибірок тестового сигналу у часовому та частотному поданні для формування коригувальних членів. На першому етапі оброблення виконується гістограмне оцінювання диференціальноїнелінійності АЦТ, а в подальшому виконується оброблення послідовностей, що відображають нелінійність АЦТ у базисі частотно-впорядкованих функцій Уолша, причому наявність інтермодуляційних складових не спотворює спектр Уолша і не знижує точності опису нелінійності АЦТ, що дає можливість виконати адекватне коригування ХП тракту та розширити його динамічний діапазон.

4. 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. Аналіз залежностей для динамічного діапазону показав, що ефект від коригування зростає зі збільшенням нелінійності ХП АЦТ і при нелінійності 10 ОМР динамічний діапазон АЦТ з цифровим коригуванням на 17 дБ ширший, ніж в аналогічного АЦТ без коригування.

5. 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 призводить до розширення динамічного діапазону АЦП і підвищує ефективність коригування нелінійності ХП усього АЦТ. Виконано аналіз динамічного діапазону для запропонованого методу, який показав, що залежно від рівня нелінійності ХП АЦП спостерігається розширення його динамічного діапазону на 6÷16 дБ порівняно з АЦП, які не використовують додаткового шуму чи застосовують низькорівневий шумовий сигнал.

6. Здійснено синтез та аналіз основних апаратних і програмних складових АЦТ перетворення ВЧ-сигналів, а саме: розроблено структуру базового АЦП, аналіз ефективності якого згідно запровадженого узагальненого критерію дозволив стверджувати, що спостерігається покращення динамічного діапазону перетворювача при збільшенні числа розрядів, водночас його апаратурна складність у 2,3…8,3 рази нижча порівняно з існуючими АЦП зчитування; розроблено 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; синтезовано алгоритм взаємних спектральних перетворень Уолша-Фур’є без реалізації алгоритму ШПФ, що дало можливість підвищити продуктивність оброблення залежно від обсягу вибірки у 2,5…2,88 рази.

7. Запропоновано інженерну методику побудови АЦТ перетворення ВЧ-сигналів, яка дала можливість розробити: структуру АЦТ, в якому застосовуються метод цифрового коригування нелінійності АЦТ, а також розробити блок-схему алгоритму калібрування ХП АЦТ, при цьому досягається широкий динамічний діапазон тракту; структуру АЦТ ВЧ-сигналів на базі модифікованого методу аналого-цифрового перетворення з додаванням шумоподібного сигналу, що характеризується широким динамічним діапазоном

8. Виконано комп’ютерне моделювання на рівні принципових електричних схем та експериментальні дослідження макетів АЦТ перетворення ВЧ-сигналів, а саме: 14-розрядного АЦТ з цифровим коригуванням нелінійності та 12-розрядного АЦТ з додатковим вхідним шумом. Виконані експериментальні дослідження підтвердили основні теоретичні положення роботи. Порівнянням результатів розрахунків динамічного діапазону розроблених АЦТ з експериментальними даними, отриманими на різних макетах і при комп’ютерному моделюванні, підтверджено достовірність запропонованих у дисертаційній роботі методів й аналітичних виразів. Запропоновані схемотехнічні рішення захищені патентами України.

9. Отримані результати роботи впроваджено у ПАТ “Маяк” і у Вінницькому центрі технічного обслуговування та експлуатації ТОВ “Атраком”, а також використовуються у навчальному процесі Вінницького національного технічного університету на кафедрі телекомунікаційних систем і телебачення.

**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 обробляння 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 надлишковмх 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 обробляння 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. 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. – 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.