Міністерство освіти і науки України

Вінницький національний технічний університет

СТАЛЬЧЕНКО ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 004.3

АНАЛОГО-ЦИФРОВІ ТРАКТИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ З КОРИГУВАННЯМ НЕЛІНІЙНОСТІ

Спеціальність 05.13.05 – комп’ютерні системи та компоненти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2015

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Бортник Геннадій Григорович,
Вінницький національний технічний університет, завідувач кафедри телекомунікаційних систем і телебачення.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Багацький Валентин Олексійович,
Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України, м. Київ, провідний науковий співробітник відділу перетворювачів форми інформації;

доктор технічних наук, професор
Мичуда Зиновій Романович,
Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри комп‘ютеризованих систем автоматики.

Захист відбудеться « 2 » жовтня 2015 р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

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

Автореферат розісланий « 1 » вересня 2015 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради С. М. Захарченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 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 А. І. Кондалєва, О. Д. Азарова. Розробленням методів покращення динамічних характеристик АЦТ займаються такі вчені, як Ю. Дженк, М. М. Гельман, У. Кестер, В. О. Маковій, Х. Лундин. Великий вклад у побудову швидкодійних інтегральних мікросхем (ІМС) АЦП з покращеними динамічними параметрами внесли Багданскіс Е.-А. К. та Марцинкявічус А.-Й. К.

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. 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 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 ХП 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 перетворення ВЧ-сигналів з широким динамічним діапазоном.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до програм та планів науково-дослідних робіт у Вінницькому національному технічному університеті, а саме: в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт “Розробка теорії та методології цифрового оброблення радіосигналів у реальному часі” (№ Держ. реєстр. 0111U001111), „Розробка інформаційних пристроїв і засобів оцінювання джитеру на базі принципів нечіткого іммітанса та цифрового оброблення сигналів“ (№ Держ. реєстр. 0114U003463) та госпдоговірної НДР „Розробка методики проектування цифрової системи передавання“ (№ Держ. реєстр. 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 цієї мети під час проведення теоретичних та експериментальних досліджень висувались 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 АЦТ перетворення ВЧ-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 ХП 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 АЦТ комп’ютерних систем цифрового оброблення ВЧ-сигналів.

Методи дослідження базуються на використанні: теорії аналого-цифрового перетворення та теорії сигналів для аналізу нелінійності АЦТ, 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 в тому, що:

1) 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;

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 нелінійність тракту, що зменшує масив оброблювальних даних до рівня окремих вихідних розрядів АЦТ і відповідно спрощує процес визначення динамічного діапазону АЦТ та підвищує наочність оцінювання рівня гармонічних спотворень сигналу у досліджуваному тракті;

3) 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;

4) 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, що дає ефект розширення динамічного діапазону АЦП і підвищує ефективність коригування нелінійності характеристики перетворення усього АЦТ.

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

- розробити інженерну методику побудови АЦТ 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;
- 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 АЦТ перетворення ВЧ-сигналів, в якому застосовуються метод цифрового коригування нелінійності АЦТ, а також розробити блок-схему алгоритму калібрування ХП АЦТ, при цьому досягається широкий динамічний діапазон тракту;
- розробити структуру АЦТ перетворення ВЧ-сигналів на базі модифікованого методу аналого-цифрового перетворення ВЧ-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 АЦТ 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.

Основні наукові результати та практичні рекомендації 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). 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“ (акт про впровадження від 3.06.2015).

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати дисертаційної роботи здобувач отримав самостійно. В наукових працях, що опубліковані у співавторстві, йому належать: [1], запропонував режими дискретизації вузькосмугових сигналів в АЦТ перетворення ВЧ-сигналів; [2], ідея цифрового коригування нелінійності АЦТ перетворення ВЧ-сигналів і табличного формування коригувальних поправок; [3], запропонував принцип апаратно-програмної реалізації керувального блоку АЦТ ВЧ-сигналів; [4], запропонував математичну модель нелінійності АЦП у базисі дискретних функцій Фур’є; [5], здійснив обґрунтування та вибір тестового сигналу для трактів комп’ютерних мереж; [6], ідея спектрального оцінювання параметрів фазового дрижання ВЧ-сигналів в АЦТ систем передавання даних; [7], сформулював шляхи покращення динамічного діапазону швидкодійних АЦП; [8], запропонував вирази для оцінювання ефективності АЦТ перетворення ВЧ-сигналів; [9], запропонував аналітичні вирази для оцінювання динамічного діапазону АЦТ перетворення ВЧ-сигналів з коригуванням нелінійності; [10], запропонував процедуру багатоетапного оброблення вибірок сигналу АЦТ; [11], 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; [12], запропонував для визначення коригувальних поправок АЦТ ВЧ-сигналів здійснювати гістограмне оцінювання диференціальної нелінійності з подальшим обробленням отриманих послідовностей у базисі частотно-впорядкованих функцій Уолша; [13], проаналізував вплив апертурного часу на динамічний діапазон швидкодійних АЦП; [14], ідея оцінювання нелінійностей АЦТ шляхом використання методів цифрового спектрального аналізу; [15], запропонував вираз для розрядної нелінійності АЦТ; [16], ідея підвищення граничної пропускної здатності АЦТ; [17], здійснив оцінку спектра сигналу з виходу АЦТ у базисі функцій Фур’є; [18], запропонував вираз для визначення рівня шумів у процесі аналого-цифрового перетворення; [19], виконав оцінку обсягу обчислень коефіцієнтів дискретного перетворення сигналів; [20], запропонував критерій ефективності алгоритмів цифрового оброблення ВЧ-сигналів; [21], запропонував вираз для визначення чутливості аналогової частини тракту систем керування з ЦОС; [22], запропонував вираз для оцінки ефективності аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів; [23], проаналізував помилки суперпозиції при дослідженні спектрів вихідних сигналів АЦТ на базі ДПФ;

[24], ідея первинного цифрового оброблення ВЧ-сигналів в АЦТ; [25], ідея введення в структуру АЦП багатопорогового компаратора; [26], ідея використання на вході АЦП аналогового ключа та підсилювача; [27], ідея збереження поправок в ПЗП скоригованих кодових символів; [28], ідея використання в АЦТ лінійки малорозрядних АЦП; [29], ідея формування цифрового шумового сигналу, що подається на одну з шин цифрового віднімача; [30], ідея використання на виході АЦП буферних регістрів; [31], ідея використанням двох аналогових ключів, які змінюють послідовне зміщення вхідного сигналу АЦП; [32], ідея двократного перетворення сигналів одним паралельним АЦП.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та були схвалені на 12 міжнародних науково-технічних конференціях: I, II, IV та V Міжнародній науково-технічній конференції „Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування“ (м. Вінниця, 2005 р., 2006., 2009р., 2011р.), XIII Міжнародній науково-технічній конференції з автоматичного управління „Автоматика-2006“ (м. Вінниця, 2006 р.), I та II Міжнародній науково-практичній конференції „Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації“ (м. Вінниця, 2007 р., 2009р.), Міжнародній науково-технічній конференції „Modern problems of radio engineerings, telecommunications and computer science (TCSET’2008)“ (м. Львів, 2008), 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.), 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), а також обласних науково-технічних конференціях.

Публікації. За підсумками наукових досліджень опубліковано 32 наукові праці, включаючи 12 статей, які входять до переліку наукових фахових видань, з них 6 статей – входять до науко-метричних баз даних, 12 публікацій – у збірниках праць Міжнародних науково-технічних конференцій, одна з них входить до науко-метричної бази «Scopus» та 8 патентів України на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, що містять 55 рисунків і 6 таблиць, висновків, списку використаних джерел (156 найменувань) і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 181 сторінку. Основний текст складає 143 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У **першому** розділі здійснено аналіз сучасного стану розробок АЦТ перетворення ВЧ-сигналів з коригуванням нелінійності. Встановлено, що існуючі методи коригування нелінійності АЦТ ВЧ-сигналів не дозволяють ефективно розширити динамічний діапазон тракту. Класичні методи забезпеченя широкого динамічного діапазону, що добре вивчені при їх застосуванні в аналогових трактах, не можуть використовуватись в АЦТ ВЧ-сигналів. Причиною цього є принципово різні фізичні процеси, що обмежують динамічний діапазон АЦТ і аналогового тракту.

Аналіз шляхів покращення динамічного діапазону тракту аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів показав, що наявність в тракті проходження ВЧ-сигналів аналого-цифрового перетворювача не лише підвищує нелінійність, але й дозволяє зменшити завади нелінійності шляхом цифрового коригування передатної характеристики АЦТ.

Найбільш ефективними методами розширення динамічного діапазону АЦТ є структурні методи, які базуються на методології цифрового коригування нелінійності АЦП і всього АЦТ. Цифрове коригування нелінійності полягає у введені в цифрову частину тракту штучної нелінійності, при якій загальна ХП нелінійного АЦТ і коригувального нелінійного елемента стає більш лінійною.

У **другому** розділі вдосконалено математичну модель нелінійності аналого-цифрового тракту комп’ютерних систем цифрового оброблення ВЧ-сигналів. Виконано дослідження впливу нелінійності на форму амплітудного спектра вихідного сигналу АЦТ у базисі дискретних функцій Фур’є. Для n-розрядного АЦТ, існує $N = 2^n$ вихідних кодових комбінацій і відповідно, порушення в *i*-му вихідному розряді (з вагою 2^i) вносить додаткову нелінійність δ_i в загальну нелінійність тракту. Ця складова, що виникає в *i*-му розряді є періодичною послідовністю з частотою 2^{n-i-1} у масиві вихідних даних АЦТ об’ємом N. Для аналізу послідовностей у частотній області, що характеризують нелінійність АЦТ, необхідно виконати дискретне перетворення Фур’є (ДПФ) $x(k) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) e^{-j\frac{2\pi km}{N}}$. Використання ДПФ різної довжини для аналізу конкретної підпослідовності спрощує кінцеве оброблення сигналів. Математична модель розрядної нелінійності ХП АЦТ у базисі дискретних функцій Фур’є має вигляд

$$\left|X_{n-i}(k)\right| = \frac{2\delta_{n-i}}{N} \cdot \frac{\left|\sin\left(\frac{\pi k}{2}\right)\right|}{\sin\left(\frac{m\pi k}{N}\right)}, \tag{1}$$

де $i = 1,2,...,n$; $m = 2^{n-i-1}$.

Помилки у різних розрядах АЦП спричиняють відповідний вплив на частотний спектр, що характеризує нелінійність АЦТ. У результаті аналізу амплітудних спектрів підпослідовностей, що відображають нелінійність АЦТ, можна отримати чисельні значення коефіцієнта гармонічних спотворень

$$K_{HD1} = 10\lg\frac{U_{20}^2 + U_{30}^2 + ... + U_{N0}^2}{U_1^2}, \text{ дБ}, \tag{2}$$

При цьому можна оцінити вклад кожного з вихідних розрядів АЦТ у загальну нелінійність тракту та знайти реальний динамічний діапазон тракту $D_r = -K_{HD}$, дБ. На базі отриманих результатів частотного аналізу у базисі дискретних функцій Фур’є можна виконати діагностування вихідних розрядів тракту та сформулювати висновки про рівні гармонічних спотворень сигналу в АЦТ і необхідність коригування нелінійності ХП АЦТ.

Запропоновано метод цифрового коригування нелінійності аналого-цифрового тракту ВЧ-сигналів, який передбачає такі етапи оброблення сигналів:

- аналіз нелінійності АЦТ з використанням базису дискретних функцій Фур’є,
- гістограмне оцінювання диференціальної нелінійності АЦТ для заданого тестового сигналу;
- визначення розрядної нелінійності АЦТ за допомогою дискретного перетворення Уолша (ДПУ);
- обчислення коригувальних поправок для досліджуваного АЦТ;
- формування скоригованих сигналів АЦТ.

Перший етап пов’язаний з оцінюванням рівня гармонічних спотворень сигналу у досліджуваному тракті за допомогою (1) і (2), три наступних етапи відповідають режиму калібрування АЦТ, а останній етап відносяться безпосередньо до робочого режиму перетворення ВЧ-сигналів в АЦТ з коригуванням.

Калібрування АЦТ пропонується здійснювати шляхом використання гістограмного оцінювання та ДПУ. Гістограмне оцінювання диференціальної нелінійності АЦТ полягає в накопиченні масиву відліків вихідного сигналу з відомою густиною ймовірності за певний період часу. Для оцінювання диференціальної нелінійності АЦТ пропонується використовувати як тестовий синусоїдальний сигнал. Для n-розрядного АЦТ з вхідним діапазоном $\pm U_{f_s}$ імовірність появи j-го коду

$$p(j) = \frac{1}{\pi}\left[\arcsin\frac{U_{f_s}\left(j-2^{n-1}\right)}{U_m \cdot 2^n} - \arcsin\frac{U_{f_s}\left(j-1-2^{n-1}\right)}{U_m \cdot 2^n}\right], \qquad (3)$$

де U_m – амплітуда синусоїдального сигналу.

Для синусоїдального тестового сигналу теоретичне число появи j-го коду визначається як

$$M_t(j) = p(j) \cdot M_\Sigma. \qquad (4)$$

Тоді диференціальна нелінійність АЦТ для заданого кодового слова

$$\delta_d(j) = \frac{M_r(j)}{p(j) \cdot M_\Sigma} - 1. \qquad (5)$$

Необхідний обсяг вибірки можна оцінити, виходячи з таких міркувань. При аналого-цифровому перетворенні синусоїдального сигналу вихідні цифрові відліки розподілені нерівномірно. Мінімальна ймовірність появи середніх кодових значень

$$p_{\min} = \frac{2}{\pi \cdot 2^{n-1}}. \qquad (6)$$

Внаслідок обмеження обсягу масиву даних середнє значення числа відліків найрідших середніх кодів визначає M з середньоквадратичним відхиленням $\sigma = \sqrt{p_{\min} \cdot M_\Sigma}$. Тоді для допустимої похибки, що дорівнює 0,1 одиниці молодшого розряду (ОМР), обсяг необхідної вибірки можна задати як

$$M_\Sigma \geq 50 \cdot \pi \cdot 2^{n-1}. \qquad (7)$$

Частотно-упорядковані функції Уолша мають таку ж періодичність, що і послідовності порушення лінійності АЦТ. Тому їх пропонується застосовувати для аналізу нелінійності ХП АЦТ шляхом використання дискретного перетворення Уолша $X_W(k) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) \cdot Wal(k,m)$, де $Wal(k,m)$ – функції Уолша. Для визначення частотно-упорядкованих функцій використовують парні функції Радемахера $C(\mu,m) = sign\left[\cos\left(2^\mu \cdot \pi \cdot m\right)\right]$:

$$Wal_w(k,m) = \prod_{\mu=0}^{N-1}\left[C(\mu,m)\right]^{g_\mu}, \qquad (8)$$

де g_μ – значення розряду у коді Грея.

Знайдено взаємозв’язок між розрядною нелінійністю АЦТ та спектральними складовими у базисі Уолша. ХП ідеального АЦТ з *n*-розрядним АЦП та числом кроків квантування $N = 2^n - 1$ може бути повністю представлена лише $m+1$ складовими спектра у базисі Уолша. При цьому $X_W(0)$ відповідає зсуву ХП АЦТ, а інші складові $X_W(k)$ – відповідним вихідним розрядам АЦТ. Тому використання ДПУ дозволяє достатньо просто та наочно оцінити нелінійність досліджуваного АЦТ. Проаналізуємо нелінійність ХП АЦТ з *n*-розрядним АЦП, що представлена на рис. 1. Використання функцій Уолша $Wal(1,0)$; $Wal(3,0)$, дає змогу отримати для $n=4$ та $N=16$:

$$X_W(1) = -1\cdot\frac{1}{N}\cdot\delta_{n-1}\cdot 0{,}5N = -0{,}5\cdot\delta_3,$$
$$X_W(3) = -1\cdot\frac{1}{N}\cdot\left(\delta_{n-2}\cdot 0{,}25N + \delta_{n-2}\cdot 0{,}25N\right) = -0{,}5\cdot\delta_2. \quad (9)$$

Звідси, у загальному випадку, можна записати для *i*-го розряду АЦП значення частотної складової у базисі Уолша

$$X_W(k) = X\left[2^{n-i}-1\right] = -0{,}5\cdot\delta_i, \quad (10)$$

де $i = 0,1,\ldots,n-1$.

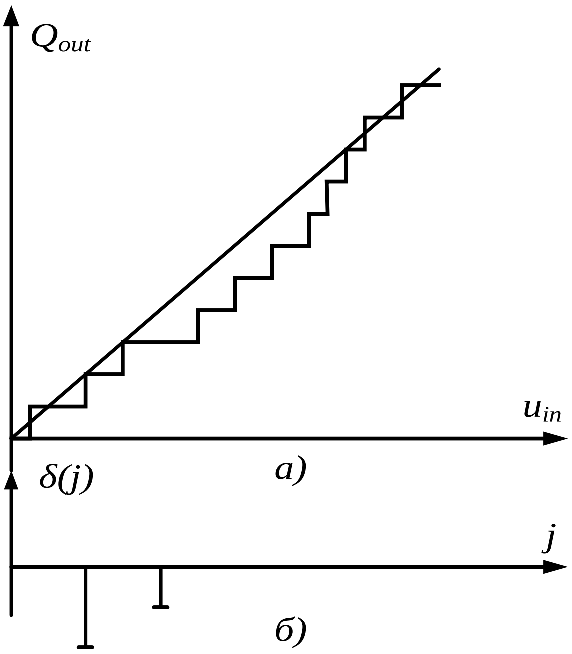

Рисунок 1 – ХП АЦТ з відповідною нелінійністю у базисі Уолша

Таким чином, розрядна нелінійність АЦТ знаходить своє відображення у відповідній складовій у базисі Уолша. ДПУ послідовності, що відображає нелінійність АЦТ для кожного спотвореного розряду формує лише одну частотну складову, що спрощує процес визначення поправки для коригування вихідного сигналу АЦТ.

Для отримання з реального кодового слова АЦТ скоригованого значення, необхідно сформувати поправку шляхом підсумовування з урахуванням знаків, значення δ_i нелінійностей окремих розрядів. Потім потрібно підсумувати отриману поправку з кодом перетвореного сигналу, тобто

$$Q_c = Q_r + \sum_{i=1}^{n}\delta_i\cdot\alpha_{ri}\,. \quad (11)$$

Узагальнена структура АЦТ, що реалізує метод цифрового коригування нелінійності наведена на рис. 2.

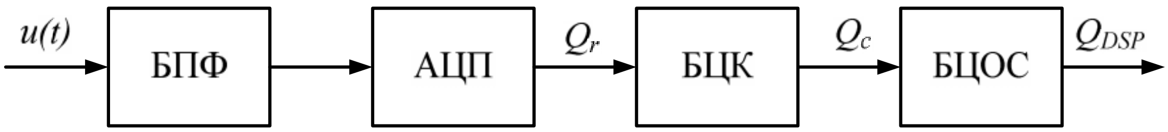

Рисунок 2 – Узагальнена структура АЦТ з цифровим коригуванням нелінійності

Вхідний сигнал $u(t)$, пройшовши відповідні перетворення у блоці підсилення та формування (БПФ), подається на вхід АЦП. Цифровий еквівалент вхідного сигналу Q_r з виходу АЦП надходить до блоку цифрового коригування (БЦК). Скориговане значення сигналу Q_c знімається з виходу БЦК і передається в блок цифрового оброблення сигналів (БЦОС), на виході якого формується сигнал Q_{DSP}.

Виконано аналіз ефективності запропонованого методу. Отримано вираз для динамічного діапазону АЦТ з коригуванням, при цьому вхідний сигнал u_{in} не повинен перевищувати повнодіапазонне значення АЦП u_{fs}:

$$D = 20\lg\left(\frac{u_{in}}{u_{fs}}\right) + 6n - 20\lg k + 4{,}8 - 20\lg\left(1 + \frac{2\delta - \Delta u}{q}\right), \qquad (12)$$

де k - пік-фактор вхідного сигналу.

Точність формування коригувальної складової Δu визначається середньоквадратичною похибкою гістограмного оцінювання нелінійності, а також втратами на неоптимальність оброблення послідовності нелінійності L згідно алгоритму ДПУ, що обумовлені квантуванням коефіцієнтів у базисі Уолша та масштабуванням даних:

$$\sigma_L = \frac{u_m \cdot \pi}{2q} \cdot \frac{1}{\sqrt{M}} \cdot 10^{\frac{L}{10}}. \qquad (13)$$

Залежність динамічного діапазону від рівня вхідного сигналу відносно повної шкали ХП для різних ступенів коригування наведена на рис. 3.

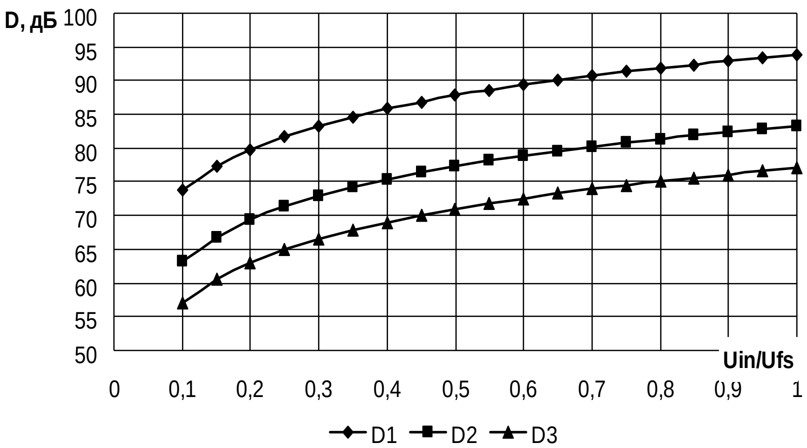

Рисунок 3 – Залежність динамічного діапазону АЦТ від рівня вхідного сигналу

Верхня крива відповідає АЦТ з коригуванням нелінійності. дві нижні криві характеризують АЦТ без коригування з нелінійністю відповідно 2 ОМР та 5 ОМР. Зі збільшенням вхідного сигналу динамічний діапазон для цих АЦТ розширюється. Але в АЦТ з коригуванням максимальне значення динамічного діапазону за умови $u_{in}/u_{fs}=1$ сягає рівня 94 дБ, а без коригування $D_{\max}$ відповідно дорівнює 83,5 дБ і 77 дБ. Таким чином, навіть при незначному рівні нелінійності (2 ОМР) динамічний діапазон АЦТ без коригування вужчий майже на 10 дБ.

Графічна інтерпретація залежності $D=f(\delta)$ 12-розрядного АЦТ для синусоїдального вхідного сигналу має вигляд, зображений на рис. 4. Верхні графіки побудовано для АЦТ з коригуванням, а нижній – без коригування. Причому криву D1 побудовано без урахування втрат на неоптимальність оброблення, для кривої D2 враховано похибки гістограмного оцінювання, а для кривої D3 враховано усі наведені вище чинники. Аналіз залежностей на рис. 4 дозволяє стверджувати, що ефект від коригування зростає зі збільшенням нелінійності АЦТ і при значенні нелінійності 10 ОМР динамічний діапазон АЦТ з цифровим коригуванням на 17 дБ ширший, ніж в аналогічного АЦТ без коригування (нижня крива D4).

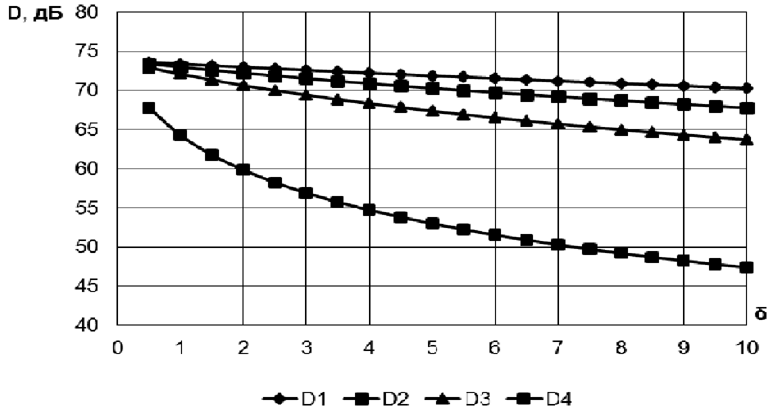

Рисунок 4 – Залежність динамічного діапазону АЦТ від нелінійності ХП

У **третьому** розділі наведено модифікований метод аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів з додаванням додаткового шумоподібного сигналу. Пропонується до вхідного сигналу із заданою смугою додавати вузькосмуговий шумовий сигнал, спектр частот якого знаходиться за межами частотного діапазону корисного сигналу. З метою підвищення ефективності коригування нелінійності АЦП необхідно як додатковий псевдовипадковий вплив, використовувати багаточастотний сигнал, який з одного боку, дає змогу досить просто формувати необхідну частотну смугу, а з іншого – реалізується на базі низки генераторів синусоїдальних сигналів з нормованими характеристиками. Для уникнення ефекту накладання спектрів, смуга частот шумового сигналу повинна бути на 10% відсотків вужчою від вільної смуги частот, тобто

$$\Delta f_{d_n}=0{,}9\left(0{,}5 f_s-f_m\right), \tag{14}$$

де f_m – максимальна складова у спектрі вхідного сигналу.

На рис. 5 наведено спектри вхідного та додаткового шумового сигналу АЦП, що представлено чотиричастотним коливанням.

Знайдено максимально допустиме значення напруги додаткового шумового сигналу. Амплітуда цього сигналу має бути такою, щоб сумарне значення корисного сигналу та шумоподібного не перевищувало максимального розмаху вхідного сигналу АЦП U_{fs}.

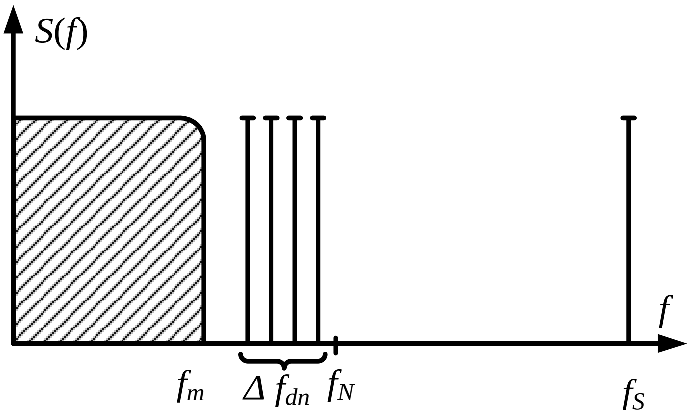

Рисунок 5 – Спектри вхідного та додаткового шумового сигналу АЦП

Якщо позначити через U_s рівень вихідного сигналу АЦП, що відповідає максимальному сигналу без обмеження при увімкненому додатковому сигналі, а через U_m – рівень вихідного сигналу АЦП, що відповідає повній шкалі перетворення то амплітуда додаткового шумоподібного сигналу дорівнює

$$U_{dn} = 0{,}5U_{fs}\left(1 - \frac{U_s}{U_m}\right). \qquad (15)$$

Структура АЦП на базі процесу коригування нелінійності за допомогою додаткового вхідного шумового сигналу наведена на рис. 6.

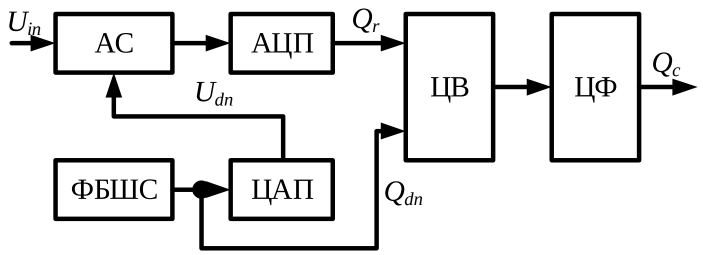

Рисунок 6 – Структура АЦП, в якій реалізовано процес коригування нелінійності за допомогою додаткового шуму

Додатковий сигнал з виходу формувача багаточастотного шумового сигналу (ФБШС) у цифровій формі подається на цифроаналоговий перетворювач (ЦАП), з виходу якого цей сигнал U_{dn} підсумовується в аналоговому суматорі (АС) з вхідним сигналом U_{in} перед подаванням його на вхід АЦП. Одночасно у цифровому вигляді цей же додатковий сигнал Q_{dn} з виходу ФБШС віднімається від вихідного сигналу АЦП Q_r у цифровому віднімачі (ЦВ). Окрім того, за допомогою цифрового фільтра (ЦФ) виконується придушення усіх частотних складових у смузі Δf_{dn}.

Проаналізовано ефективність запропонованого методу. Отримано вираз для динамічного діапазону АЦП з додатковим шумовим сигналом та з урахуванням потужності шумів квантування, характеристики вхідного сигналу та режиму дискретизації АЦП:

$$D = 20\lg\frac{U_{in} - U_{dn}}{U_{fs}} + 6n - 20\lg k + 4{,}8 - 20\lg\left[1 + E\left(\frac{3\delta}{q}\right)\right] + 10\lg\frac{f_s}{2f_{in}}. \qquad (16)$$

На рис. 7 наведено залежності динамічного діапазону від нелінійності ХП АЦП для різних значень додаткового шумового сигналу.

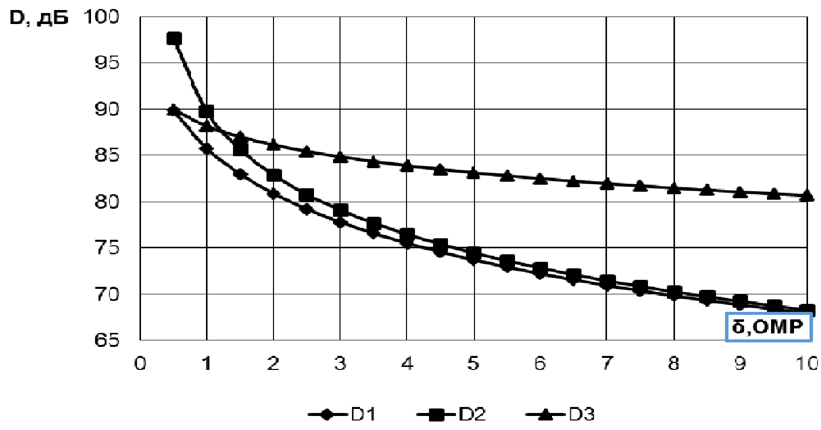

Рисунок 7 – Залежність динамічного діапазону 16-розрядного АЦП від нелінійності ХП для різного рівня додаткового шумового сигналу

Нижня крива відповідає відсутності на вході АЦП додаткового шумового сигналу, тобто $U_{dn} = 0$. Для середньої кривої амплітуда додаткового шуму дорівнює кроку квантування, тобто $U_{dn} = 1\ OMP$. Для верхньої кривої амплітуда шумоподібного сигналу задається згідно виразу (17), тобто $U_{dn} >> 1\ OMP$.

Такий рівень додаткового сигналу дає ефект розширення динамічного діапазону особливо в зоні великих нелінійностей. Так, при $\delta = 10\ OMP$ динамічний діапазон АЦП має досить високе значення 81 дБ, в той же час інші два випадки функціонування АЦП демонструють за таких умов нелінійності зменшення динамічного діапазону на 13 дБ – до значення 68 дБ. Низькоамплітудний додатковий шумовий сигнал є ефективним засобом покращення динамічного діапазону АЦП лише при малих значеннях нелінійності (0,5÷1 ОМР). При цьому динамічний діапазон АЦП змінюється від 98 до 90 дБ, а за відсутності додаткового шуму динамічний діапазон звужується з 90 до 86 дБ.

На рис. 8 наведено залежності динамічного діапазону від нелінійності ХП АЦП для різних типів і амплітуд вхідних сигналів. Нижні криві характеризують динамічний діапазон АЦП без додаткового шуму. Верхні криві відповідають роботі АЦП з додатковим шумом, при цьому відбувається розширення динамічного діапазону на 6÷14 дБ залежно від рівня нелінійності.

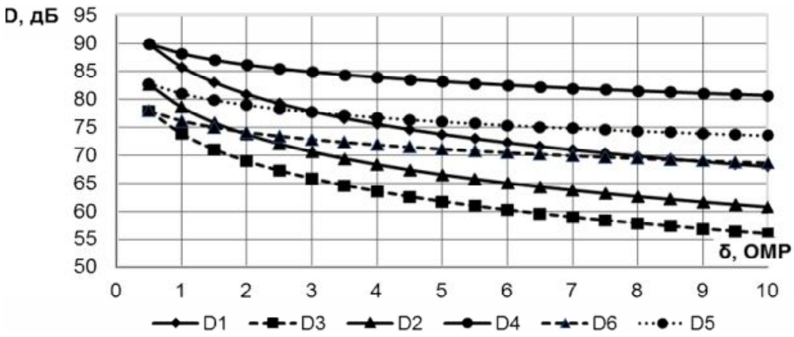

Рисунок 8 – Залежність $D = f(\delta)$ для різних типів і амплітуд вхідних сигналів

Слід зазначити, що при роботі АЦП з рівнем сигналу $U_{in} = 0{,}25U_{fs}$ звужується динамічний діапазон на 12 дБ, тому потрібно дотримуватись повного охоплення шкали квантування вхідним сигналам АЦП.

Розроблено структуру базового АЦП паралельного типу (рис.9), у якому розширення динамічного діапазону, не призводить до значного апаратурного ускладнення.

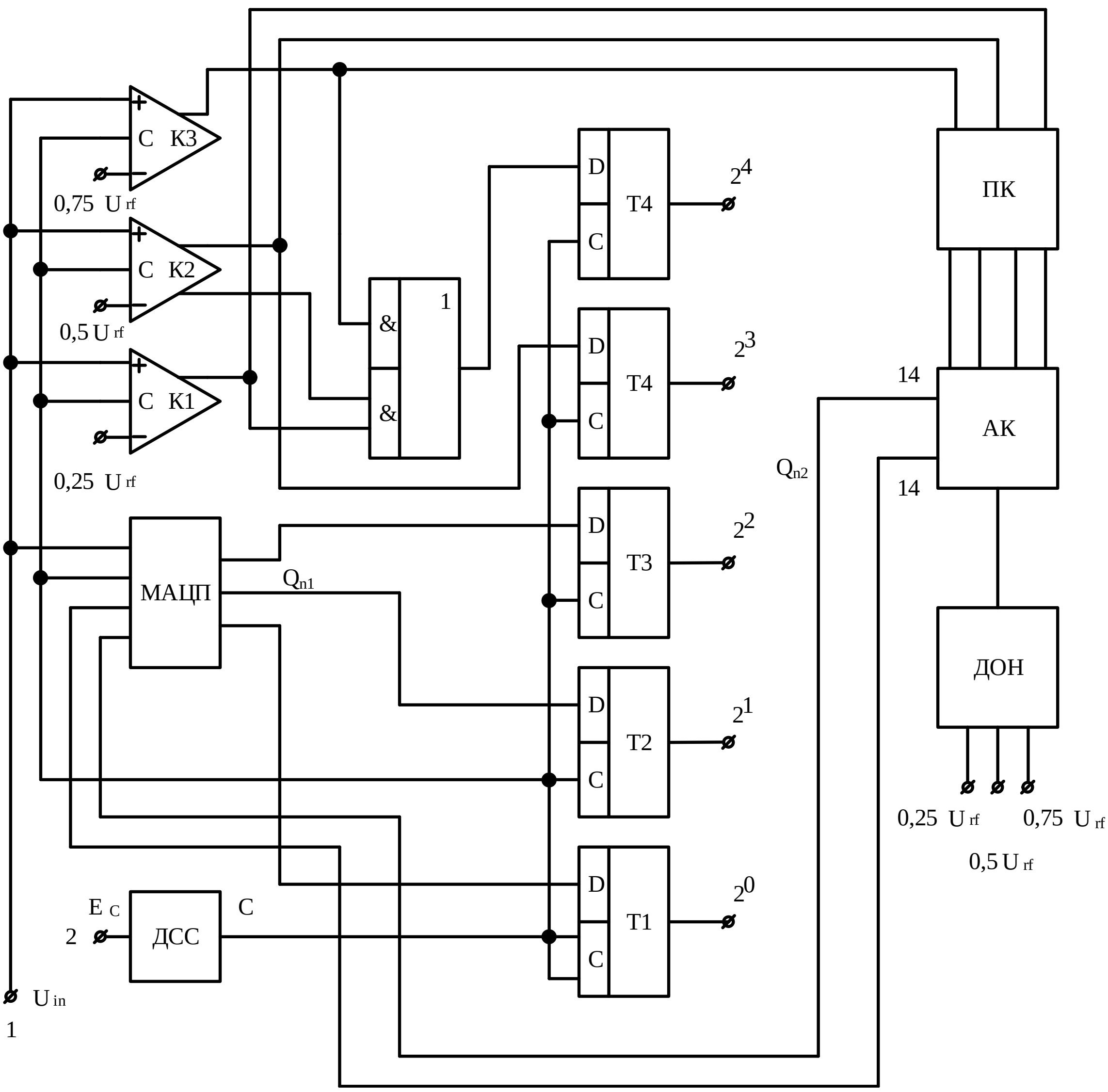

Рисунок 9 – Структурна схема базового АЦП

Пристрій містить компаратори (К) старших розрядів, малорозрядний АЦП (МАЦП), перетворювач коду (ПК), аналоговий комутатор (АК), джерело опорної напруги ДОН, джерело стробуючого сигналу (ДСЕ). Число компараторів старших розрядів залежить як від вибраного числа n двійкових розрядів АЦП, так і від числа n_1 розрядів паралельного МАЦП і дорівнює $2^{n-n_1}-1$. Проаналізовано ефективність базового АЦП паралельного типу згідно запровадженого узагальненого критерію

$$Q_{BADC}=\frac{10^{\frac{6n+1,8}{20}}}{\left(2^{n1}+2^{n2}-2\right)\cdot\frac{t_c}{T_s}}. \qquad (17)$$

Аналіз ефективності АЦП дозволив стверджувати, що спостерігається покращення динамічного діапазону перетворювача при збільшенні числа розрядів, при цьому відбувається покращення узагальненого критерію ефективності, водночас апаратурна складність перетворювача залишається на достатньо прийнятному рівні.

На основі таблично-алгоритмічного методу побудови та на базі принципу кусково-лінійної апроксимації (КЛА) при синтезі тестового сигналу, розроблено структуру цифро-аналогового генератора сигналів (ГТС). Доведено, що цей метод дозволяє скоротити обсяг ПЗП порівняно з табличним методом прямого синтезу. Аналіз ефективності згідно уведеного критерію, показав, що зі збільшенням динамічного діапазону ГТС ефективність табличного методу на базі КЛА зростає і для 16-розрядного представлення тестового сигналу дорівнює 32. Таким чином, реалізація ГТС на базі КЛА дозволяє ліквідувати основну заваду на шляху використання стандартних ПЗП у структурі генератора за рахунок різкого зменшення обсягу пам’яті.

Запропоновано для спектрального аналізу сигналів АЦТ використовувати алгоритми взаємних спектральних відображень (ВСВ). Розроблений алгоритм ШПУ дає можливість отримати спектр вихідного сигналу АЦТ у системі частотно-впорядкованих функцій Уолша-Качмажа. Запропоновано виконати процедуру ВСВ Уолша-Фур’є, уникнувши при цьому реалізації алгоритму ШПФ до вихідних сигналів АЦТ. На базі використання відомої WF-моделі ядра Фур’є, розроблено алгоритм швидкого перетворення спектра $X_W(k)$ у базисі Уолша в спектр $X_F(k)$ у базисі Фур’є того ж вихідного сигналу АЦТ. Аналіз ефективності розробленого алгоритму показав, що коефіцієнт продуктивності залишається майже постійним залежно від обсягу вибірки (розрядності АЦТ) і дорівнює $2{,}5 \div 2{,}88$.

У **четвертому** розділі запропоновано інженерну методику побудови АЦТ перетворення ВЧ-сигналів, яка дала можливість створювати комп’ютерні системи цифрового оброблення сигналів з широким динамічним діапазоном. Наведено основні вирази, що застосовуються при розробленні АЦТ.

Виконано розробку структури АЦТ перетворення ВЧ-сигналів (рис.10), в якому застосовуються метод цифрового коригування нелінійності АЦТ.

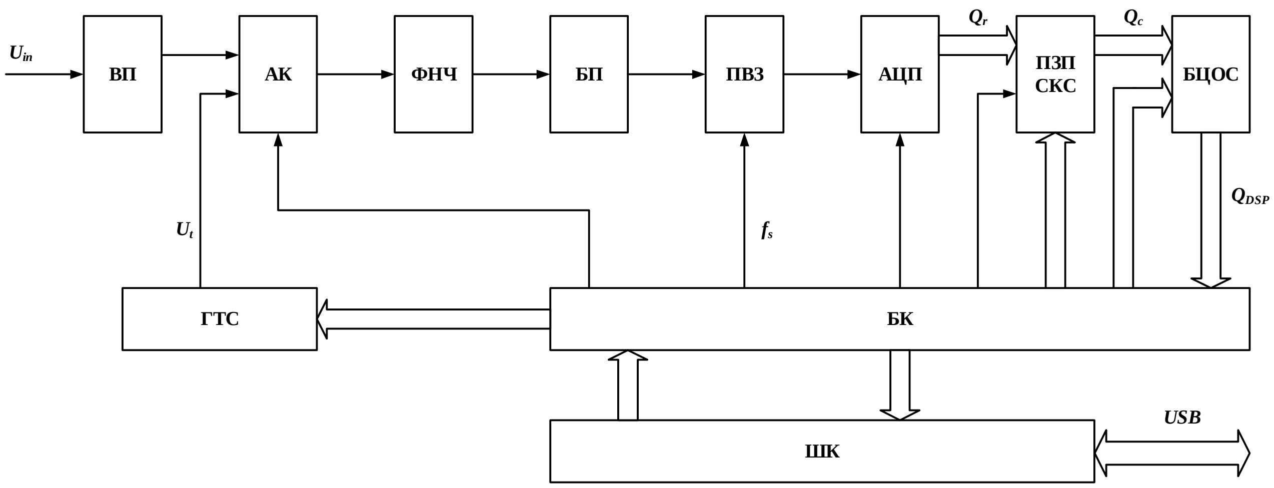

Рисунок 10 – Структура АЦТ ВЧ-сигналів з цифровим коригуванням

Цифрова частина АЦТ містить постійний запам’ятовуючий пристрій скоригованих кодових сигналів (ПЗК СКС), блок ЦОС (БЦОС), блок керування (БК) та шинний контролер (ШК). Режим калібрування АЦТ передує основному режиму перетворення. АЦТ калібрується при подачі синусоїдального тестового сигналу з ГТС у всіх точках ХП. Нелінійність АЦТ покращується за рахунок введення поправок в результаті аналого-цифрового перетворення Q_r і запису в ПЗП СКС скоригованих кодових символів Q_c. У блоці ЦОС виконується попереднє цифрове оброблення сигналів Q_c і формування результатів оброблення Q_{DSP}. Розроблено блок-схему алгоритму калібрування ХП АЦТ.

На базі запропонованого у III розділі модифікованого методу аналого-цифрового перетворення сигналів з додатковим шумоподібним сигналом, розроблено структуру АЦТ ВЧ-сигналів, що наведена на рис. 11.

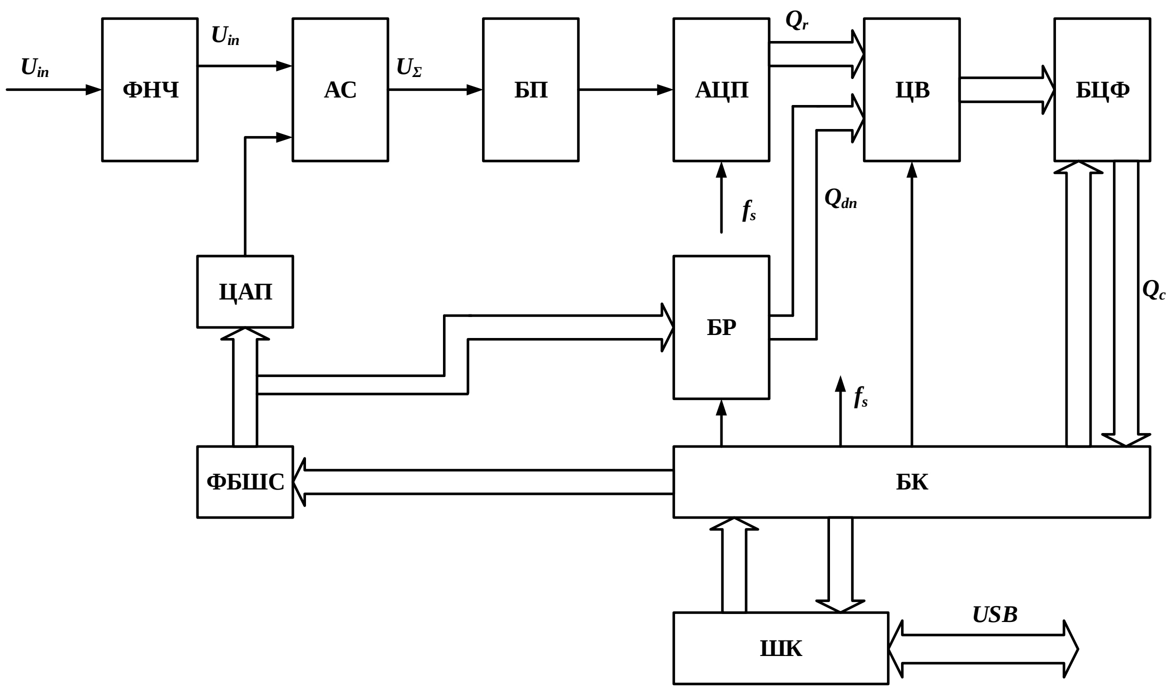

Рисунок 11 – Структура АЦТ ВЧ-сигналів на базі АЦП з додатковим шумом

У цій структурі з виходу формувача багатотонального шумоподібного сигналу (ФБШС) додатковий сигнал в аналоговій формі U_{dn} через ЦАП подається на один з входів аналогового суматора (АС), а в цифровій формі Q_{dn} через буферний регістр (БР) цей же сигнал подається на одну з шин цифрового віднімача (ЦВ). Суміш вхідного та додаткового сигналів через буферний підсилювач БП подається на вхід АЦП і перетворюється за допомогою АЦП у цифровий код Q_r. На виході ЦВ формується різниця $Q_r - Q_{dn}$, а в блоці цифрової фільтрації (БЦФ) виконується придушення частотних складових шумоподібного сигналу. Вихідна шина БЦФ є виходом АЦТ, на якому формується скоригований вихідний сигнал Q_c.

Проведене комп’ютерне моделювання на рівні принципових електричних схем АЦТ з коригуванням нелінійності й АЦТ з додатковим шумом, підтвердило теоретичні положення та аналітичні висновки, отримані у II і III розділах роботи.

Здійснено розробку діючих макетних зразків аналого-цифрового тракту перетворення ВЧ-сигналів, 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.

Експериментальні дослідження макетів згідно спектральної методики довели, що цифрове коригування нелінійності дозволяє розширити динамічний діапазон АЦТ на 14…17 дБ залежно від смуги робочих частот. Випробування макету АЦТ з додатковим вхідним шумом довели, що удосконалений метод аналого-цифрового перетворення дозволяє розширити динамічний діапазон АЦТ на 9…13 дБ.

Наведені результати експериментальних досліджень підтверджують отримані висновки, що метод цифрового коригування нелінійності АЦТ та удосконалений метод аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів з додатковим вхідним шумом дають змогу розширити динамічний діапазон тракту у широкій смузі робочих частот.

У **додатках** наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи, комп’ютерні моделі АЦТ ВЧ-сигналів, що реалізють метод цифрового коригування нелінійності та метод аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів з додаванням шуму, а також зовнішній вигляд макетів АЦТ з цифровим коригуванням нелінійності та з додатковим шумовим сигналом.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертації наведене теоретичне узагальнення та вирішення наукового завдання щодо розширення динамічного діапазону АЦТ ВЧ-сигналів комп’ютерних систем шляхом коригування нелінійності характеристики перетворення тракту. Найважливіші теоретичні та практичні результати 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 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 нелінійність тракту, що зменшує масив оброблювальних даних до рівня окремих вихідних розрядів АЦТ і відповідно спрощує процес визначення 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 диференціальної нелінійності 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 ХП, 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 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 показав, 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 зменшення обсягу 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. 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.

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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

За темою дослідження опубліковано 32 наукові праці:

1. 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.

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

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Стальченко О. В. Швидкодійний аналого-цифровий перетворювач з компенсацією динамічних похибок / Г. Г. Бортник, О. В. Стальченко, В. А. Челоян, // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2011. – №1. – С. 114–118. – ISSN 2219-9365.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. Стальченко О. Аналіз впливу апертурного часу на динамічні параметри швидкодійних аналого-цифрових перетворювачів / С. Бортник, О. Стальченко // Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПМРТП-2005): матеріали І Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 2-5 червня. 2005 р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – С. 49–50. – ISBN 966-641-195-4.

14. 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.

15. Стальченко О. 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.

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

17. 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.

18. Стальченко О. Метод підвищення завадостійкості паралельно-послідовного аналого-цифрового перетворювача / Г. Бортник, В. Челоян, О. Стальченко // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації: матеріали I Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 22-24 квіт. 2009 р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – С. 182–183.– ISBN 978-966-641-304-1.

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

20. Стальченко О. Швидкий алгоритм перетворення на базі Вейвлета Хаара / Г. Бортник, О. Стальченко // Інформаційні технології та коп'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.

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

22. 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.

23. Стальченко О. Спектральний метод аналізу сигналів з використанням вейвлет-перетворень / Г. Бортник, О. Стальченко // Радіотехнічні поля, сигнали,

апарати та системи: матеріали Міжнар. науково-технічної конф., Київ, 10–16 бер. 2014 р. – 2014. – С. 27. – ISSN 2311-4169.

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

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

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

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

28. Патент на корисну модель 35545 Україна, МПК H03M 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.

29. Патент на корисну модель 35547. Україна, МПК H03M 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.

30. Патент на корисну модель 86550. Україна, МПК НОЗ К 13/02. Аналого-цифровий перетворювач / Бортник Г. Г., Васильківський М. В., Стальченко О. В.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет.– № 201304679; заявл. 15.04.2013; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1. – 3 с.

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

32. 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.

АНОТАЦІЯ

Стальченко О. В. Аналого-цифрові тракти перетворення високочастотних сигналів з коригуванням нелінійності. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп’ютерні системи та компоненти. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, – 2015.

Дисертацію присвячено розробці методів розширенню динамічного діапазону аналого-цифрового тракту (АЦТ) ВЧ-сигналів комп’ютерних систем шляхом коригування нелінійності характеристики перетворення (ХП) тракту.

Удосконалено математичну модель нелінійності АЦТ перетворення ВЧ-сигналів, яка враховує вплив кожного рівня квантування на загальну нелінійність тракту, що спрощує процес визначення динамічного діапазону АЦТ та підвищує наочність оцінювання гармонічних спотворень сигналу.

Запропоновано метод цифрового коригування нелінійності АЦТ перетворення ВЧ-сигналів, який використовує оброблення вибірок тестового сигналу у часовому та частотному поданні для формування коригувальних членів, що дає можливість розширити динамічний діапазон АЦТ.

Отримано аналітичні вирази для оцінювання динамічного діапазону АЦТ з коригуванням, які враховують потужність завад, параметри вхідних сигналів і точність формування поправок.

Удосконалено метод аналого-цифрового перетворення ВЧ-сигналів з додаванням додаткового шумоподібного сигналу, який використовує як додатковий вузькосмуговий шум, спектр частот якого знаходиться за межами частотного діапазону корисного сигналу і амплітуда цього шуму перевищує значення кроку квантування АЦП.

На базі запропонованої інженерної методики побудови розроблено структуру АЦТ, в якому застосовуються метод цифрового коригування нелінійності та структуру АЦТ ВЧ-сигналів на базі модифікованого методу аналого-цифрового перетворення з додаванням шумоподібного сигналу.

Ключові слова: аналого-цифровий тракт, нелінійність характеристики перетворення, високочастотні сигнали, коригування нелінійності, цифрове оброблення ВЧ-сигналів.

АННОТАЦИЯ

Стальченко А.В. Аналого-цифровые тракты преобразования высокочастотных сигналов с корректировкой нелинейности. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2015.

Диссертация посвящена разработке методов расширения динамического диапазона аналого-цифрового тракта (АЦТ) ВЧ-сигналов компьютерных систем путем корректировки нелинейности характеристики преобразования (ХП) тракта.

Усовершенствована математическая модель нелинейности аналого-цифрового тракта компьютерных систем цифровой обработки ВЧ-сигналов, которая за счет использования базиса дискретных функций Фурье, учитывает влияние каждого уровня квантования на общую нелинейность тракта, что уменьшает массив обрабатываемых данных до уровня отдельных выходных разрядов АЦТ и соответственно упрощает процесс определения реального динамического диапазона АЦТ и повышает наглядность оценки уровня гармонических искажений сигнала в исследуемом тракте.

Предложен новый метод цифровой корректировки нелинейности аналого-цифрового тракта ВЧ-сигналов, использующий обработку выборок тестового сигнала во временном и частотном представлении для формирования корректирующих членов. На первом этапе обработки выполняется гистограммная оценка дифференциальной нелинейности АЦТ, а в дальнейшем выполняется обработка последовательностей, отображающих нелинейность АЦТ в базисе частотно-упорядоченных функций Уолша, причем наличие интермодуляционных составляющих не искажает спектр Уолша, что дает возможность выполнить адекватную корректировку ХП тракта и расширить его динамический диапазон.

Получены аналитические выражения для оценки динамического диапазона АЦТ с корректировкой, которые учитывают мощность помех, что являются следствием нелинейности ХП, параметры входных сигналов и точность формирования поправок, что позволяет определить эффективность метода цифровой корректировки нелинейности АЦТ ВЧ-сигналов и избрать необходимый режим калибровки тракта.

Усовершенствован метод аналого-цифрового преобразования ВЧ-сигналов с добавлением дополнительного шумоподобного сигнала, который использует как дополнительный узкополосный шум, спектр частот которого находится за пределами частотного диапазона полезного сигнала и амплитуда этого шума превышает значение шага квантования аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а в цифровом виде этот же дополнительный шум вычитается от исходного сигнала АЦП, что приводит к расширению динамического диапазона АЦП и повышает эффективность корректировки нелинейности ХП всего АЦТ.

Выполнен синтез и анализ основных аппаратных и программных составляющих АЦТ преобразования ВЧ-сигналов. Розработана структурная схема базового АЦП, анализ эффективности которой согласно предложенного обобщенного критерия показал, что наблюдается улучшение динамического диапазона преобразователя при увеличении числа разрядов, одновременно его аппаратурная сложность в 2,3…8,3 раза ниже по сравнению с существующими АЦП считывания. Разработана на основе таблично-алгоритмического метода построения структурная схема цифро-аналогового генератора тестовых сигналов АЦТ, реализация которого на базе принципа кусочно-линейной аппроксимации при синтезе сигнала позволяет ликвидировать основную проблему при использовании стандартных постоянных запоминающих устройств в структуре генератора за счет резкого уменьшения объёма необходимой памяти. Выполнен синтез алгоритма взаимных спектральных преобразований Уолша-Фурье без реализации алгоритма быстрого преобразования Фурье, что даёт возможность увеличить производительность обработки в зависимости от объёма выборки в 2,5…2,88 раза.

Разработана структурная схема аналого-цифрового тракта преобразования высокочастотных сигналов, в котором используется метод цифровой корректировки разрядной нелинейности АЦТ, а также разработана блок-схема алгоритма калибровки ХП АЦТ, при этом достигается широкий динамический диапазон тракта.

Разработана структурная схема АЦТ преобразования ВЧ-сигналов на базе модифицированного метода аналого-цифрового преобразования высокочастотных сигналов с дополнительным шумоподобным сигналом, что характеризуется широким динамическим диапазоном.

Выполнено компьютерное моделирование на уровне принципиальных электрических схем АЦТ з корректировкой нелинейности и АЦТ с дополнительным шумом.

Осуществлено разработку действующих макетных образцов аналого-цифрового тракта преобразования ВЧ-сигналов: 14-разрядного АЦТ с цифровой корректировкой нелинейности на базе интегральных микросхем типа 1107ПВ5А и 12-разрядного АЦТ з дополнительным входным шумом на базе интегральных микросхем типа AD9230.

Экспериментальные исследования макетов согласно спектральной методики доказали, что цифровая корректировка нелинейности позволяет расширить динамический диапазон АЦТ на 14…17 дБ в зависимости от полосы рабочих частот. Испытания макета АЦТ с дополнительным входным шумом доказали, что усовершенствованный метод аналого-цифрового преобразования позволяет расширить динамический диапазон АЦТ на 9…13 дБ.

Ключевые слова: аналого-цифровой тракт, нелинейность характеристики преобразования, высокочастотные сигналы, корректировка нелинейности, цифровая обработка ВЧ-сигналов.

ABSTRACT

Stalchenko O.V Analog-digital high frequency signals conversion paths with non-linearity correction. – Manuscript.

The thesis submitted for the candidate of science degree by specialty 05.13.05 – computer systems and components. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. – 2015.

The thesis is devoted to developing dynamic range expansion methods for the analog-digital path (ADP) of computer system HF signals by correcting the path conversion characteristics (CC) non-linearity.

The mathematical model for non-linearity of the analog-digital path used in computer systems processing HF signals is improved. The model takes into account every quantization level impact due, accordingly simplifies process of the ADP real dynamic range determination and increases obviousness of signal harmonic distortion estimation.

The new method of digital correction for the HF signals analog-digital path non-linearity is proposed, it uses processing test signal samples at time and frequency representations to form correcting components and its dynamic range expansion.

Analytical expressions for the ADP dynamic range estimation with correction are obtained, which consider noise power, input signals parameters and adjustment formation accuracy.

The method of HF signals analog-digital conversion with adding an auxiliary noise-type signal is improved, it uses narrow-band noise as auxiliary one, whose spectrum is out of the desired signal frequency range and its amplitude exceeds the ADC quantization step.

The ADP structure using the non-linearity digital correction method and the HF signals ADP structure based on the modified method of the analog-digital conversion with adding a noise-type signal are developed on a base of the offered technical strategy.

Keywords: analog-digital path, conversion characteristics non-linearity, high-frequency signals, non-linearity correction, HF signals digital processing.

Підписано до друку 28.08.2015 р. Формат 29.7×42 ¼
Наклад 100 прим. Зам. № 2015-085
Віддруковано в комп’ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59