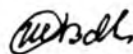


ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ШАПОШНИКОВ ОЛЕГ ВАЛЕНТИНОВИЧ



УДК 681.335

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ВИСОКОТОЧНИХ
КОНВЕЄРНИХ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ
ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ**

Спеціальність 05.13.05 – Елементи та пристрої обчислювальної техніки
та систем керування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2002

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Азаров Олексій Дмитрович,
Вінницький державний технічний університет,
завідувач кафедри обчислювальної техніки

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Багацький Валентин Олексійович,**
Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, м. Київ, провідний
науковий співробітник відділу перетворювачів форми інформації

кандидат технічних наук **Мичуда Леся Зиновіївна,** Національний
університет “Львівська політехніка”, м. Львів, доцент кафедри автоматизації
теплових та хімічних процесів

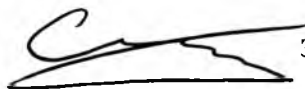
Провідна установа: Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”, кафедра
автоматизації експериментальних досліджень,
Міністерство освіти і науки України, м. Київ

Захист відбудеться “15” 02 2003 р. о 9³⁰ год. на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому державному
технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе,
95, ГУК.

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

Автореферат розісланий “13” 01 2003 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Захарченко С.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Під час створення високопродуктивних систем цифрової реєстрації й обробки аналогових сигналів, систем автоматичного управління, систем аналізу параметрів відео- та аудіо-сигналів, інформаційно-вимірювальних та контрольно-діагностичних систем однією з актуальних проблем є розробка високоточних, швидкодіючих (високопродуктивних) аналого-цифрових (АЦП) й цифроаналогових перетворювачів (ЦАП).

У теперішній час покращення технічних характеристик ЦАП і АЦП виконується переважно двома шляхами: удосконаленням елементної бази та удосконаленням структур і алгоритмів функціонування.

Перший напрямок має назву технологічного і передбачає широке використання нових фізичних явищ, технологій, матеріалів і досягнень мікроелектроніки для покращення параметрів АЦП і ЦАП [1]. Проте, по мірі підвищення вимог до метрологічних характеристик АЦП і ЦАП, що виготовлюються на основі гібридної та інтегральної технології, виникають фундаментальні обмеження, які обумовлені похибками припасування параметрів аналогових вузлів у процесі їх виготовлення, а також нестабільністю цих параметрів у часі та під час змінення умов навколишнього середовища.

Другий напрям пов'язано з уведенням у пристрої структурної надлишковості у вигляді додаткових блоків і відповідних алгоритмів функціонування, використання яких дозволяє покращити точносні характеристики, зокрема, шляхом компенсування похибок або коригування отриманого результату перетворення.

Основними перевагами використання конвеєрних АЦП є висока швидкість перетворення та низький рівень споживання потужності, які у поєднанні з низькою вартістю реалізації за КМОН технологією, роблять їх привабливими для користувачів. Але технологічні обмеження виготовлення мікросхем конвеєрних АЦП, а також специфічне накопичення похибок заважають підвищенню рівня точності конвеєрного АЦ-перетворення, яка, у першу чергу, визначається похибками каскадних АЦП-ЦАП, пристроїв вибірки-зберігання (ПВЗ), підсилення різниці та інших.

Починаючи з кінця 70-х років, в Україні та за кордоном у техніці АЦП та ЦАП почали використовувати метод інформаційної надлишковості, зокрема, у вигляді надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ). Використання таких систем числення в АЦП порозрядного врівноваження, побудованих на низькоточній елементній базі, дозволяє комплексно вирішувати проблеми підвищення їх точності та швидкодії. Водночас, використання такого підходу для підвищення точності та швидкодії конвеєрних АЦП вимагає детальних додаткових досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалась в рамках держбюджетної теми 52-Д-201 "Дослідження принципів уведення інформаційної надлишковості для підвищення точності та швидкості аналого-цифрового перетворення", номер держ. Реєстр. №0199U003435.

Мета й задачі дослідження. Метою досліджень є підвищення точності конвеєрних АЦП, побудованих на низькоточних аналогових вузлах, за рахунок використання вагової надлишковості у вигляді надлишкових позиційних систем числення.

Основними задачами дослідження є:

1. Аналіз існуючих методів побудови та підвищення точності конвеєрних АЦП.
2. Розробка методу формування нерозривної передатної характеристики конвеєрного АЦ-перетворення з використанням принципу вагової надлишковості.
3. Розробка математичних моделей статичних похибок конвеєрних АЦП із ваговою надлишковістю, побудованих на низькоточній елементній базі.
4. Розробка методів підвищення точності конвеєрних АЦП із зниженими вимогами щодо первинних похибок елементної бази шляхом цифрового калібрування ваг розрядів.
5. Оцінювання ефективності уведення вагової надлишковості у високоточні конвеєрні АЦП із нерозривною передатною характеристикою.
6. Розробка структурних схем високоточних самокаліброваних високопродуктивних конвеєрних АЦП із ваговою надлишковістю, побудованих на низькоточній елементній базі.
7. Розроблення рекомендацій щодо використання високоточних самокаліброваних конвеєрних АЦП із ваговою надлишковістю в системах реєстрації та обробки аналогових сигналів, а також проектування високопродуктивних конвеєрних АЦП із ваговою надлишковістю у вигляді напівзамовних ВІС у мікроелектронному виконанні.
8. Розроблення рекомендацій щодо використання сучасних САПР під час проектування аналогової частини конвеєрних АЦП із ваговою надлишковістю та створення допоміжних програмних засобів комп'ютерного моделювання процесу перетворення для вказаного класу пристроїв, а також функціонування їх окремих вузлів і блоків.

Об'єкт дослідження -- процес накопичення статичних похибок під час конвеєрного аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення, що породжує проблему підвищення точності.

Предмет дослідження – високоточні самокалібровані конвеєрні АЦП із ваговою надлишковістю, побудовані на низькоточних аналогових вузлах і блоках.

Методи дослідження базуються на використанні: теорії АЦ-перетворення та математичного моделювання для аналізу нерозривності

передатної характеристики; теорії похибок для розроблення моделей статичних похибок та методів калібрування ваг розрядів; теорії чисел та чисельних методів для вибору рівня вагової надлишковості систем числення, що застосовуються; комп'ютерному моделюванні під час аналізу функціонування як окремих вузлів, так і всього пристрою в цілому, а також для перевіряння справедливості отриманих теоретичних положень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що:

- уперше запропоновано використовувати вагову надлишковість для підвищення точності конвеєрного АЦ-перетворення за умов застосування в пристроях, що розробляються, низькоточної елементної бази;
- удосконалено метод формування нерозривної передатної характеристики конвеєрного АЦ-перетворення, який базується на використанні вагової надлишковості у вигляді НПСЧ;
- удосконалено математичні моделі статичних похибок високопродуктивних конвеєрних АЦП із ваговою надлишковістю, аналіз яких дозволив визначити шляхи підвищення точності перетворення;
- подальшого розвитку дістали методи калібрування ваг розрядів високопродуктивних конвеєрних АЦП із ваговою надлишковістю на низькоточних аналогових вузлах за стратегією “знизу-догори” і “всі одразу”, що дозволяють підвищити точність перетворення у порівнянні з первинною точністю елементної бази без фізичного впливу на параметри аналогових вузлів та без зменшення швидкості АЦ-врівноваження;
- уперше розроблено методи побудови високопродуктивних високоточних конвеєрних АЦП із ваговою надлишковістю на низькоточних аналогових вузлах, використовуючи методи самокалібрування ваг розрядів за рахунок вагової надлишковості;
- уперше отримано оцінки ефективності уведення вагової надлишковості у високоточні високопродуктивні самокалібровані конвеєрні АЦП із зниженими вимогами щодо первинних похибок елементної бази.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що на основі отриманих наукових результатів запропоновано рекомендації:

- з розробки структур високопродуктивних конвеєрних АЦП із ваговою надлишковістю на низькоточній елементній базі, які реалізують запропоновані методи калібрування ваг розрядів для підвищення точності перетворення. Це дає змогу створювати пристрої конвеєрного АЦ-перетворення за спрощеною технологією виготовлення аналогових вузлів, точність перетворення яких практично не буде залежати від зміни умов навколишнього середовища і протягом усього часу експлуатування;
- з використання високопродуктивних конвеєрних АЦП із ваговою надлишковістю, побудованих на низькоточній елементній базі, у вимірювально-інформаційних системах перевірки якості телевізійних каналів і трактів та для створення високопродуктивних телекомунікаційних систем;

- щодо схемотехнічного проектування високопродуктивних самокаліброваних конвеєрних АЦП із ваговою надлишковістю, побудованих на низькоточній елементній базі;
- щодо використання сучасних засобів автоматичного проектування (САПР) та розроблення спеціалізованого допоміжного програмного забезпечення комп'ютерного моделювання процесу перетворення для високопродуктивних конвеєрних АЦП із ваговою надлишковістю, побудованих на низькоточній елементній базі.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачем: [2] – запропоновано структуру та алгоритм роботи самокаліброваної системи цифрової реєстрації аналогової інформації з підвищеною стабільністю статичних метрологічних характеристик; [3] – проведено огляд принципів уведення надлишковості у високопродуктивні АЦП, зокрема, у АЦП порозрядного наближення; [4] – запропоновано два методи калібрування ваг розрядів конвеєрних АЦП із ваговою надлишковістю та структури, які дозволяють реалізовувати запропоновані методи; [5], [8] розглянуто моделі похибок конвеєрних АЦП із ваговою надлишковістю; [6] – запропоновано структуру високоточного конвеєрного АЦП, в якому за рахунок введення нових блоків, зв'язків між ними та окремої процедури самокалібрування зменшуються технологічні вимоги до окремих блоків та вузлів пристрою; [7] – запропоновано структуру самокаліброваного конвеєрного АЦП із ваговою надлишковістю та розрядним коефіцієнтом (-1;0;1); [9] – запропоновано метод формування нерозривної передатної характеристики конвеєрних АЦП із ваговою надлишковістю, побудованих на низькоточних аналогових вузлах.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на восьмій міжнародній науково-технічній конференції “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах” (ВОТТП8-01, Хмельницький, 2001 р.), на VI міжнародній конференції “Контроль і управління в складних системах” (КУСС-2001, Вінниця, ВДТУ, 2001 р.), на дев'ятій міжнародній науково-технічній конференції “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах” (ВОТТП9-02, Хмельницький, 2001 р.), на щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Вінницького державного технічного університету (Вінниця, ВДТУ, 1997-2002 рр.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 5 статтях у фахових наукових журналах, що входять до відповідного переліку ВАК України, у 2 збірниках наукових праць, 1 публікації у вигляді тез доповідей та 1 патенті на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел, який складається з

168 найменувань, і додатків. Загальний обсяг дисертації 229 сторінок, із яких основний зміст викладено на 147 сторінках друкованого тексту, містить 79 рисунків та 13 таблиць. Додатки містять акти впровадження результатів роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі до дисертації обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету роботи та задачі дослідження. Охарактеризовано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, показано зв'язок поставлених задач із плановими науковими дослідженнями.

У першому розділі проведено аналіз стану техніки конвеєрного аналого-цифрового перетворення. Розглянуто сучасні методи побудови конвеєрних АЦП, а також методи підвищення їх точності.

Показано, що роль конвеєрних АЦП серед усього спектру АЦП постійно збільшується завдяки тому, що конвеєрний підхід дозволяє значно підвищити продуктивність АЦ-перетворення, при цьому рівень споживання потужності остається низьким.

Водночас конвеєрні АЦП мають ряд недоліків, головним із яких є низька точність перетворення через накопичення похибок каскадів врівноваження. Спроби будувати конвеєрні АЦП на низькоточній елементній базі призводять до ще більшого зниження загальної точності перетворення. Під низькоточною елементною базою слід розуміти такі аналогові вузли або блоки, рівень інструментальних похибок яких може бути більше і навіть значно більше, ніж рівень підсумкових статичних похибок перетворення. Наприклад, технологічні можливості завдання номіналів в інтегральних схемах, зокрема, без лазерного припасування, для резисторів складає: $0.1 \pm 1\%$ (по абсолютній величині $-10 \div 30\%$), а для конденсаторів – $0.01 \div 0.1\%$ (по абсолютній величині $-5 \div 20\%$). Використання такої елементної бази дозволяє досягти точності перетворення, яка відповідає $2 \div 8$ двійковим розрядам.

Показано, що головною проблемою, яка потребує вирішення, є: підвищення точності конвеєрних АЦП, у тому числі конвеєрних АЦП, побудованих на низькоточній елементній базі. Вирішення цієї проблеми за рахунок уведення структурної надлишковості у вигляді додаткових вузлів і блоків призводить до зростання складності та ціни виробу, рівня споживаної потужності тощо.

Показано, що галузями використання високоточних конвеєрних АЦП є: системи високопродуктивної обробки та ресстрації аналогових сигналів, професійне відео, медичне ультразвукове сканування, цифровий осцилограф, аналізатори спектра та інші. Сформульовано напрям і задачі досліджень.

У другому розділі розглянуто методи високоточного конвеєрного АЦ-перетворення з ваговою надлишковістю. Проведено аналіз можливих варіантів формування перетворювальних шкал для різних каскадів врівноваження конвеєрних АЦП із різними розрядними коефіцієнтами. За результатами аналізу отримано системи обмежень, які є умовами

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Шапошніков О.В. Огляд сучасних методів побудови високопродуктивних конвеєрних аналого-цифрових перетворювачів // Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2001. – Т. 3, №1. – С. 55-62.
2. Азаров О.Д., Скрипник О.С., Шапошніков О.В. Розробка самокаліброваної системи цифрової реєстрації аналогової інформації // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – №2. С. 73-78.
3. Азаров О.Д., Шапошніков О.В. Дослідження високопродуктивного аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення // Вісник ВПІ. – 2000. – №4. – С. 76-80.
4. Азаров О.Д., Шапошніков О.В. Підвищення точності швидкодіючих АЦП конвеєрного типу методом інформаційної надлишковості // Вісник ВПІ. – 2001. – №5. – С. 68-73.
5. Азаров О.Д., Шапошніков О.В. Моделі похибок самокаліброваних конвеєрних АЦП на основі інформаційної надлишковості // Вісник ВПІ. – 2001. – №6. – С. 122-126.
6. Пат. №44073А України, 7 Н03М1/42. Конвеєрний аналого-цифровий перетворювач / О.Д. Азаров, О.В. Шапошніков (Україна). – №2001042458; Заявл. 12.04.2001; Опубл. 15.01.2002, Бюл. №1. – 5 с.
7. Азаров О.Д., Шапошніков О.В. Конвеєрний АЦП з розрядним коефіцієнтом (-1;0;1) на основі інформаційної надлишковості // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Зб. наук. пр. – Хмельницький: ТУП, 2001. – С. 122-124.
8. Азаров О.Д., Шапошніков О.В. Моделі похибок самокаліброваних конвеєрних АЦП на основі інформаційної надлишковості // Тези доповідей VI міжнародної конференції “Контроль і управління в складних системах. (КУСС-2001)”. – Вінниця: УНІВЕРСУМ. – 2001. – С. 118.
9. Азаров О.Д., Шапошніков О.В. Метод формування нерозривної шкали перетворення конвеєрних АЦП // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Зб. наук. пр. – Хмельницький: ТУП, 2002. – С. 14-17.

АНОТАЦІЇ

Шапошніков О.В. Дослідження та розробка високоточних конвеєрних аналого-цифрових перетворювачів із ваговою надлишковістю. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – елементи та пристрої обчислювальної техніки та систем керування. – Вінницький державний технічний університет, Вінниця, 2002.

Дисертацію присвячено підвищенню точності високопродуктивних конвеєрних АЦП за рахунок використання вагової надлишковості у вигляді надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ). Розроблено метод формування нерозривної передатної характеристики за рахунок обрання такого рівня вагової надлишковості, який би відповідав рівню інструментальних похибок елементної бази. Розроблено методи зменшення похибок конвеєрних АЦП із ваговою надлишковістю шляхом проведення процедури самокалібрування ваг розрядів. Проведено оцінювання ефективності уведення вагової надлишковості та складності таких конвеєрних АЦП у порівнянні зі звичайними конвеєрними АЦП. Запропоновано рекомендації щодо використання сучасних САПР під час проектування конвеєрних АЦП із ваговою надлишковістю та побудови на їх базі високопродуктивних систем реєстрації та обробки аналогових сигналів.

Ключові слова: аналого-цифрове перетворення, вагова надлишковість, надлишкові позиційні системи числення, самокалібрування, точність, статичні похибки, конвеєрні аналого-цифрові перетворювачі.

Shaposhnikov O.V. Research and design the high-precision pipeline analog-to-digital converters with redundant place values. – Manuscript.

Dissertation for candidate of technical sciences degree field 05.13.05 – elements and devices of computer facilities and systems of control. – Vinnytsia State Technical University, Vinnytsia, 2002.

The dissertation is devoted to the improvement of precision of the highly productive pipeline ADCs by using the redundant place values in the form of redundant positional counting systems (RPCS). The method of forming of the indissoluble characteristic input-output at the expense of choosing such level of the redundant place values corresponding to the instrumental errors level was developed. The methods of decrease errors of the pipeline ADCs with redundant place values using the process of self-calibration were also developed. The efficiency of the using the redundant place values is estimated. The complexity of such pipeline ADCs comparing with serial production pipeline ADCs is estimated. The recommendations of the using the contemporary CAD systems for designing of the pipeline ADCs with redundant place values and building on their base the highly productive data registration and data processing systems are suggested.

Key words: analog-to-digital conversion, redundant place value, redundant positional counting system, self-calibration, precision, static errors, pipeline analog-to-digital converter.

Шапошников О.В. Исследование и разработка высокоточных конвейерных аналого-цифровых преобразователей с весовой избыточностью. – Рукопись.

Диссертация на получение ученой степени кандидата технических наук за специальностью 05.13.05 – элементы и устройства вычислительной техники и систем управления. – Винницкий государственный технический университет, Винница, 2002.

Диссертация посвящена повышению точности высокопроизводительных конвейерных АЦП за счет использования весовой избыточности в виде избыточных позиционных систем счисления (ИПСС). Разработан метод формирования неразрывной передаточной характеристики за счет выбора такого уровня весовой избыточности, который бы соответствовал уровню инструментальных погрешностей элементной базы.

Разработаны модели статических погрешностей конвейерного аналого-цифрового преобразования, которые позволили определить пути снижения их влияния на результат преобразования. Разработаны методы уменьшения статических погрешностей конвейерных АЦП с весовой избыточностью путем проведения процедур самокалибрования весов разрядов стратегиями «снизу-вверх» и «все сразу».

Оценено сложность структур существующих и предлагаемых конвейерных АЦП. Показано, что сложность предложенных высокоточных конвейерных АЦП с весовой избыточностью меньше в 2÷5 раз по сравнению со сложностью серийных высокоточных конвейерных АЦП.

Проведены оценки эффективности введение весовой избыточности для уменьшения требований точности задача статических свойств элементной базы, которая входит в состав блока преобразование конвейерного АЦП с весовой избыточностью. Показано, что в данном случае наиболее эффективными являются значения: $\alpha=1.37$ и $\alpha=1.596$. Проведен анализ эффективности введения весовой избыточности для повышения быстродействия устройства сравнения аналоговых величин и устройства формирования и усиления аналоговой разности.

Предложены структуры высокопроизводительных самокалиброванных конвейерных АЦП с весовой избыточностью на основе обобщенных структур каскадов уравнивания, которые позволяют уменьшить как аппаратные затраты на построение отдельного каскада уравнивания, так и уменьшить общее количество каскадов уравниваемости, которые входят в состав блока преобразования.

Разработаны рекомендации по построению высокопроизводительных систем регистрации и обработки аналоговых сигналов с повышенной стабильностью статических метрологических характеристик на базе высокоточных самокалиброванных конвейерных АЦП с весовой избыточностью, построенных на низкоточной элементной базе, за счет калибрования весов разрядов, которые позволяют поддерживать заданную точность преобразования при изменении условий окружающей среды и на протяжении всего времени эксплуатации. Предложены рекомендации по

проектированию конвейерных АЦП с весовой избыточностью в виде полузаказных БИС, программированных аналоговых матриц и с использованием достижений SI микросхемотехники.

Разработаны рекомендации по использованию современных САПР для проектирования аналоговой части конвейерных АЦП с весовой избыточностью, а также специализированного программного обеспечения для компьютерного моделирования процесса преобразования в конвейерных АЦП с весовой избыточностью, построенных на низкоточной элементной базе. Показано, что введение процедур калибрования весов разрядов, позволяет значительно уменьшить уровень дифференциальной и интегральной нелинейности.

Ключевые слова: аналого-цифровое преобразование, весовая избыточность, избыточные позиционные системы счисления, самокалибрование, точность, статические погрешности, конвейерные аналого-цифровые преобразователи.