

**ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

На правах рукопису

**Азаров Олексій Дмитрович**

**Розробка теорії аналого-цифрового перетворення на  
основі надлишкових позиційних систем числення**

Спеціальність: 05.11.16 - інформаційно-вимірювальні системи  
(в науці та промисловості)

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня доктора  
технічних наук

Вінниця - 1994



00339965 (Z)

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі обчислювальної техніки  
Вінницького державного технічного університету.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

КОНДАЛЄВ Андрій Іванович,

доктор технічних наук, професор

СКРИПНИК Юрій Олексійович,


доктор технічних наук, професор

ВОЛОДАРСЬКИЙ Євген Тимофійович.

Провідна установа: Інститут проблем математичних машин  
та систем НАН України (м. Київ).

Захист відбудеться «27» січня 1995р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 10.01.01 у Вінницькому державному технічному університеті за адресою: 286021, Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці  
Вінницького державного технічного університету.  
Автореферат розісланий «14» грудня 1994р.

Учений секретар спеціалізованої ради  ЮХИМЧУК С.В.

## 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП) у сукупності з цифрованалоговими (ЦАП) створюють клас перетворювачів форми інформації (КФІ), котрі досить часто використовують разом із ЦОМ у складі різноманітних систем. При цьому АЦП та ЦАП розглядаються як системні перетворювачі інформації (СПІ). Причому СПІ, в свою чергу, виконують роль аналого-цифрових підсистем, які в залежності від призначення систем реалізують функції сполучення з об'єктом, аналого-цифрових контролерів, інтерфейсів, спецпроцесорів, підсистем тестування, збору й обробки вимірjuвальної інформації, аналізу й синтезу сигналів та інше.

Особливо серйозні вимоги висувються щодо характеристик СПІ, які входять до складу інформаційно-вимірjuвальних систем (ІВС). В першу чергу це є точність та швидкодія. Удосконалення вказаних характеристик в центральним напрямком досліджень у галузі отримання, перетворення та обробки аналогової інформації. Розв'язанням проблем підвищення точності та швидкодії тривалий час займалися наукові школи А.І. Кондалева, В.Б.Смолова, Е.І.Гітиса, П.П. Орнатського, Б.І. Швецького, О.П. Стахова, Д.М. Туза, В.М. Шляндина, М.П. Чапенка та інш.

Традиційно вказані проблеми вирішувались і частково вирішуються за рахунок використання більш досконалої елементної бази. Проте в умовах, коли можливості технології висчерпані, потрібні нові принципово інші підходи, що базуються на введенні надлишковості на різних рівнях проектування систем та пристроїв: функціонально-алгоритмічному, структурно-

схемотехнічному та інформаційному.

Слід зазначити, що перший та другий напрямки достатньо тривалий період знаходять місце в теоретичних дослідженнях ряду наукових шкіл і дали свої позитивні наслідки. Проте згадані підходи в основному дозволяють розв'язувати тільки одну з проблем: або підвищення точності, або - швидкодії. В зв'язку з цим певну нішу займають дослідження, що спрямовані на комплексне вирішення проблем точності та швидкодії шляхом введення в СПІ інформаційної надлишковості, зокрема, у формі надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ). Актуальність цього напрямку підтверджується позитивними практичними результатами як в Україні, так і за кордоном. Причому НПСЧ, що використовується в СПІ, в загальному випадку слід розглядати як внутрішню (робочу) по відношенню до основної (двійкової) системи числення, у котрій функціонують цифрові обчислювальні пристрої в рамках структури ІВС.

Метою досліджень є розробка теорії аналого-цифрового перетворення на основі НПСЧ, інженерних методик та рекомендацій по проектуванню високоточних швидкодіючих АЦП і ЦАП високої роздільності, а також інформаційно-виміривальних систем із застосуванням цих пристроїв.

Поставлена мета досягається розв'язанням задач, до складу яких входять:

- розробка й аналіз способів підвищення точності АЦП середньої та високої швидкодії;
- розробка методик досліджень і складення математичних моделей динамічних похибок АЦП на основі НПСЧ;
- розробка й аналіз способів підвищення швидкості аналого-цифрового перетворення на основі НПСЧ;

- побудова критеріїв та оцінювання ефективності використання НПСЧ на етапі проектування при спільному підвищенні точності та швидкодії СПІ;

- розробка рекомендацій по проектуванню високоточних самокалібруючих і самокоригуючих швидкодіючих АЦП, систем цифрової реєстрації й обробки аналогової інформації на їх основі, а також аналогових вузлів СПІ на перспективній елементній базі.

Методи досліджень базуються на математичному моделюванні процесів аналого-цифрового перетворення, теорії чисел, чисельних методах обчислювань, теорії інформації, методах машинного аналізу електронних схем, теорії сигналів та апараті спеціальних функцій та теорії вимірювань.

Наукова новизна полягає в розробці теорії аналого-цифрового перетворення на основі НПСЧ, яка обґрунтовує можливість комплексного вирішення проблем підвищення точності та швидкодії АЦП високої роздільності шляхом введення інформаційної надлишковості у формі НПСЧ. Отримані результати є новим вагомим внеском у розвиток загальної теорії перетворювачів форми інформації в напрямку створення високоточних швидкодіючих АЦП системного застосування.

Практична цінність полягає в тому, що:

- розроблено методику ефективного вибору НПСЧ, яка дозволяє на етапі проектування розрахувати умови функціонування, за якими спільне підвищення точності й досягнення максимальної швидкодії системного АЦП здійснюється з мінімальними додатковими витратами обладнання;

- розроблені рекомендації по проектуванню самокалібруючих і самокоригуючих швидкодіючих АЦП, а також високоточних швид-

кодуючих систем цифрової реєстрації й обробки аналогової інформації на їх основі;

- розроблені інженерні рекомендації по схемотехнічному проектуванню аналогових вузлів АЦП і ЦАП на основі НПСЧ з реалізацією на перспективній елементній базі у вигляді напівзастосованих ВІС;

- створено програмне забезпечення, що дозволяє на етапі проектування шляхом моделювання оцінювати швидкодію АЦП при змінюванні параметрів та умов перетворення.

Основні наукові положення, що виносяться на захист.

В області загальної теорії:

1. Принцип комплексного підвищення точності та швидкості аналого-цифрового порозрядного перетворення високої роздільності, який оснований на введенні інформаційної надлишковості на рівні вибору системи числення.
2. Способи підвищення точності, а також прискорення аналого-цифрового перетворення на основі НПСЧ з використанням та без використання форсуючих аналогових сигналів.
3. Методики досліджень динамічних похибок і складення математичних моделей похибок усталення компенсуючого сигналу при прискореному аналого-цифровому перетворенні.
4. Математичні моделі похибок усталення при прискореному самокомпенсуючому й форсованому перетворенні на основі НПСЧ  $(1, T)$  та НПСЧ  $(0, 1)$ , а також моделі вхідних та форсуючих компенсуючих аналогових сигналів.
5. Математичні моделі похибок усталення при прискореному аналого-цифровому перетворенні на основі НПСЧ з урахуванням впливу додаткових чинників: ненульових початкових умов врівноваження, типу перехідного процесу при формуванні компенсу-

його сигналу, змінюванні рівня вхідного сигналу.

У теорії проектування:

1. Методика та критерії ефективного вибору НПСЧ при введенні інформаційної надлишковості, що дозволяють підвищувати точність та досягати максимальної швидкодії АЦП з мінімальними додатковими витратами обладнання.

2. Рекомендації по структурному проектуванню високоточних самокалібруючих та самокоригуючих швидкодійчих АЦП і ЦАП високої роздільності, а також систем цифрової реєстрації та обробки аналогової інформації на їх основі.

3. Інженерні рекомендації по схемотехнічному проектуванню аналогових вузлів системних АЦП і ЦАП на основі НПСЧ з реалізацією на перспективній елементній базі у вигляді ВІС.

Реалізація результатів досліджень. Основні положення, методики, рекомендації та висновки використані при проектуванні й розробці високоточних швидкодійчих АЦП і ЦАП високої роздільності, систем цифрової реєстрації й обробки аналогової інформації на їх основі, а також у навчальному процесі. Впроваджені вироби та пристрої:

- багатоканальна інформаційно-вимірювальна система збору та реєстрації сейсмоакустичної інформації ПАСМ-120;

- автоматизований аналізатор параметрів трактів звукового мовлення на базі швидкодійчих самокоригуючих АЦП і ЦАП, сполучених з ПЕОМ типу IBM PC/XT/AT;

- комплект високоточних самокоригуючих аналого-цифрових модулів та вимірювальних блоків для ПЕОМ типу IBM PC/AT (САЦП-МКЗ, СПАК-2, БКФІ-1С, БПІ-03);

- комплект твердотільних напівзамовних ВІС аналогових вузлів високоточних швидкодійчих АЦП і ЦАП (високочутлива схема по-

і відмовостійких, високонадійних обчислювальних, вимірвальних, інформаційно-реєстраційних систем, систем перздаті й відображення інформації".

3. Науково-технічна програма ДКНТ 6.04.04 "Відкриті інформаційно-вимірвальні системи та автоматизація вимірювань".

4. Наказ ВПІ від 30.04.92. Тема 52-Д51 "Проектування мікроелектронних аналого-цифрових вузлів для швидкодіючих перетворювачів форми інформації на основі НПСЧ".

5. Програма мінмашпрому України №48 "Створення конкурентно-спроможних засобів відображення інформації й технології їх виробництва". Тема "Створення та серійне освоєння 16-розрядних IBM сумісних самокоригуючих АШП і ЦАП для високоточних систем вимірювань, цифрової обробки та відображення вимірвальної інформації".

Апробація роботи . Положення дисертації та результати досліджень доповідались і обговорювались на:

- IV-VI Всесоюзних та VII Міжнародному симпозиумах "Проблеми створення перетворювачів форми інформації" Київ, 1980, 1984, 1988, 1992 рр.;

- республіканських науково - технічних конференціях "Питання теорії та проектування перетворювачів форми інформації" - Київ, Вінниця, Тернопіль, 1983 - 90рр.;

- республіканській конференції "Питання проектування та практичного використання ПДІ в керуючих та обчислювальних комплексах" - Одеса, 1990р.;

- Всесоюзних конференціях по вимірвальним інформаційним системам "ІВС - 81" - Львів, 1982р та "ІВС - 85" - Вінниця, 1985рр.;

- Всесоюзних конференціях "Методи та мікроелектронні

івняння струмів, перетворювач код-струм, високолінійний швидкісний ППС для пристрою вибірки та зберігання аналогових сигналів, схема погодження логічних рівнів).

У навчальному процесі матеріали дисертації використовуються при читанні лекційних курсів "Схемотехніка ЕОМ", "Перетворювачі інформації та аналого-цифрові мікропроцесори", "Теорія та автоматизація проектування ЕОМ", а також при проведенні лабораторних робіт, практичних занять, курсового й дипломного проектування студентами спеціальностей 2201 та Б47 у Вінницькому державному технічному університеті й відображені в навчальних посібниках:

1. Высокопроизводительные преобразователи информации на основе избыточных систем счисления / А.П. Стахов, А.Д. Азаров, В.П. Марценюк и др. - К.: УМК, 1988. - 180 с.
2. Избыточные позиционные системы счисления в технике преобразования информации // Избыточные системы счисления, моделирование, обработка данных и системное проектирование в технике преобразования информации: Учеб. пособие. - К. Вища шк., 1990, С.62-105.

Зв'язок теми дисертації з плановими дослідженнями.

Робота виконувалась у відповідності до таких постанов, наказів та програм:

1. Постанова Президії АН України від 14.06.89 "Коди й комп'ютери Фібоначчі. Новий підхід до створення вимірвальних, обчислювальних та керуючих систем нових поколінь".
2. Наказ Мінвузу УРСР №78 від 21.03.91 року. Тема Д-8 "Розвиток теорії чисел Фібоначчі й створення нових інформаційних арифметичних і схемотехнічних основ самоконтролюючих

засоби цифрового перетворення та обробки сигналів" - Рига, 1983, 1989рр.;

- Всесоюзній конференції "Функціональна оптоелектроніка в обчислювальній техніці й пристроях керування" - Тбілісі, 1986р.;

- Всесоюзній конференції "Оптоелектронні методи й засоби обробки зображень" - Вінниця - Тбілісі, 1987р.;

- республіканській науково - технічній конференції "Перспективи розвитку та застосування швидкодіючих перетворювачів форми даних" - Вільнюс, 1985р.;

- Всесоюзній науково-технічній конференції "Перспективи розвитку техніки радіомовного прийому, радіомовлення, звукопідсилювання та акустики" - Ленінград, 1988р.;

- науково-технічній конференції країн СНД "Контроль та керування в технічних системах" - Вінниця, 1992р.;

- щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Вінницького політехнічного інституту - Вінниця, 1979-1994рр.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 103 роботи, у тому числі 2 навчальних посібника, отримано 5 зарубіжних патентів та 63 авторських свідоцтва на винахід; 11 робіт опубліковано без співавторів. Результати виконаних досліджень відображені крім того в звітах по НДР.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається із вступу, п'яти глав, висновку, списку використаних джерел та додатків. Дисертація має загальний обсяг 438 сторінок, з яких основний зміст міститься на 296 сторінках, включаючи рисунки та таблиці на 53 сторінках, список використаних джерел із 240

найменувань на 26 сторінках; додатки - на 117 сторінках.

Автор висловлює щиро подяку О. П. Стахову за підтримку та допомогу в проведенні досліджень.

## 2. ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність проблем досліджуваних. Характеризовано наукову новизну та практичну значимість одержаних результатів, показано зв'язок проблем, що розв'язуються з планами наукових досліджень. Приведено структуру та коротку анотацію глав дисертаційної роботи.

У першій главі проводиться огляд сучасного стану й аналізуються тенденції розвитку техніки перетворювачів інформації системного застосування. Розглянуто структурні особливості й параметри АЩ і ЦАП високої роздільності в системах вимірювань, реєстрації та цифрової обробки аналогових сигналів. Відзначається, що розвиток засобів цифрової обчислювальної техніки істотно вплинув на розширення функціональних можливостей інформаційно-вимірювальних та інформаційно-обчислювальних систем (ІОС). СПІ роблять ЦОМ цілком незалежними від різновидів та типів джерел інформації, в ролі яких виступають давачі та вимірювальні прилади. Перед розробниками ІВС та ІОС при цьому постає задача адекватного стикування з комп'ютером пристроїв, що сприймають інформацію від об'єкту.

Проте використання комп'ютера є ефективним лише тоді, коли застосовувані СПІ не вносять обмежень по точності та швидкодії в процес перетворення інформації. З іншого боку, цифрова обробка інформації за допомогою комп'ютера дозволяє не тільки покращити метрологічні характеристики АЩ за раху-

нок введення автоматичної калібровки та самокоригування статичних похибок аналогових вузлів, але й підвищити точність одержання вимірювальної інформації за рахунок цифрового коригування передатних характеристик давачів.

СПІ поширено використовуються в системах моделювання, автоматизації наукових досліджень і проектування, а також перевірки АЦП та ЦАП; установках контролю параметрів лінійних інтегральних схем; сейсмозвідці; цифровому високоякісному звукозапису та звуковідтвориванні; цифрових ваговимірювальних установках; електронно-променевої літографії й т.п. ІВС та ІОС, що тут застосовуються, повинні містити СПІ, котрі задовольняють комплексу вимог як у плані функціонально-архітектурних рішень, так і метрологічних характеристик. Найважливішими з цих вимог є високі роздільна здатність - 12-20 біт, точність (похибка - 0,05-0,005%), лінійність (похибка - 0,01-0,001%), а також досить широкі границі частоти відліків -  $10^2$ - $10^8$  Гц. Це висуває актуальні проблеми створення високоточних, високолінійних, швидкодіючих АЦП високої роздільності.

Аналіз сучасних принципів підвищення точності, лінійності та швидкодії багаторозрядних АЦП показує, що це здійснюється переважно за рахунок введення різних форм надлишковості. Використовування, зокрема, структурної надлишковості дає змогу підвищити швидкість при паралельно-послідовному перетворенні. Недолік вказаного підходу полягає в ускладненні схеми аналогової частини, значних апаратних витратах, високому енергоспоживанні та низькій перешкодостійкості. З середини 80-років набув поширення метод перетворення, який ґрунтується на введенні інформаційної надлишковості й відо-

ний як сигма-дельта дискретизація із частотою, що значно перевищує частоту за Котельниковим (Найквістом). В такому перетворювачі здійснюється цифровоаналогове диференцювання форми вхідного сигналу, а його відновлення виконується шляхом інтегрування в цифровому фільтрі. Недоліком таких перетворювачів є неефективна робота при стрибкоподібному змінненні вхідного аналогового сигналу, зокрема, в багатоканальних системах.

З кінця 70-років починають використовувати інформаційну надлишковість у формі НПСЧ. Першим серійним виробом, що застосовує цей підхід, був АЦП моделі IC1-7115 американської фірми "Intersil". Проте виграв по швидкодії (в два рази) у ньому був невеликим внаслідок низького рівня введеної надлишковості, а використовуване програмне коригування статичних похибок є неефективним при змінненні умов зовнішнього середовища. У 80-роках під керівництвом і при безпосередній участі автора були створені перші зразки високоточних швидкодіючих АЦП на основі НПСЧ типу "золотої" пропорції. Проте в той час були відсутні узагальнені моделі статичних та динамічних похибок перетворення, в тому числі в умовах впливу додаткових чинників, методика й критерії ефективного вибору НПСЧ при підвищенні точності й швидкодії, рекомендації щодо використання СПІ в ІВС, ІОС та інше. Це свідчило про необхідність проведення широкого комплексу досліджень з метов розробки теорії аналого-цифрового перетворення на основі НПСЧ.

Надлишкові позиційні системи числення можна розбити на дві групи: з дробовою й цілочисловою взгво розрядів. У першій групі, що призначена для зображення дійсних чисел, будь-яке число  $A$  можна вирезити у вигляді

$$A = \sum_{i=1}^{n-1} a_i \alpha^i, \text{ де } i\text{-номер розряду; } a_i \in (0,1) \text{ або } a_i \in (1,T) -$$

двійкова цифра в  $i$ -му розряді;  $\alpha^i$ -вага  $i$ -го розряду;  $\alpha$ -основа НПСЧ (відношення ваги сусідніх розрядів), значення якої знаходиться у границях  $1.0 < \alpha \leq 2.0$ . На практиці доцільно використовувати вираз для натуральних чисел

$$N = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \alpha^i.$$

До НПСЧ з дробовою вагою розрядів, зокрема, належать так звані системи числення "золотої"  $\varphi$ -пропорції, запропоновані А.П.Стаховим. Прикладом НПСЧ з цілочисловою вагою розрядів можуть служити системи на основі  $\varphi$ -чисел Фібоначчі.

Відмітною особливістю НПСЧ є багатозначність зображення чисел. Це дозволяє формувати нерозривну характеристику вхід-вихід ЦАП або АЦП при наявності великих статичних або динамічних похибок у процесі врівноваження. Ця обставина покладена в основу побудови самокалібруючих та самокоригуючих АЦП і ЦАП із використанням низькоточних аналогових вузлів, в також застосовується для скорочення тривалості такту при порозрядному аналого-цифровому перетворенні, за рахунок чого підвищується швидкодія. Невід'ємною рисою НПСЧ є подовження розрядної сітки. Коефіцієнт подовження  $\gamma_n = \ln 2 / \ln \alpha$  для окремих  $\alpha$  має такі значення

$\alpha$	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00
$\gamma_n$	3.80	2.64	2.06	1.71	1.48	1.31	1.18	1.08	1.00.

Проблеми дисертаційної роботи сформульовані як підвищення в комплексі точності та швидкості аналого-цифрового

перетворення високої роздільної здатності за рахунок введення інформаційної надлишковості у формі НПСЧ. Визначені напрямки та задачі досліджень в області загальної теорії й теорії проектування системних перетворювачів інформації на основі НПСЧ та аналогових вузлів на перспективній елементній базі, а також створення з використанням цих апаратних засобів високоточних швидкодіючих ІВС та ІОС.

У другій главі проводиться розробка загальних положень теорії аналого-цифрового перетворення на основі НПСЧ. Аналізуються запропоновані способи підвищення точності АЦП середньої та високої швидкості. Відзначається, що наявність у двійковому ЦАП паралельної дії інструментальних похибок, зокрема, відхилень ваги розрядів від потрібних значень призводить до появи розривів у характеристиці перетворення (характеристика вхід-вихід). Застосування такого ЦАП в АЦП не дозволяє точно врівноважувати вхідний аналоговий сигнал  $A_{ВХ}$  компенсуючим  $A_{К}$ . У цьому випадку для досягнення лінійної характеристики вхід-вихід необхідно, зокрема, в АЦП порозрядного кодування коригувати сам процес аналого-цифрового врівноваження, що зменшує швидкість перетворення. При застосуванні НПСЧ розривів не буде, якщо відхилення ваги розрядів ЦАП не перевищують значень, які дорівнюють

$$\delta Q_{ст} = \frac{\sum_0^{n-2} Q_1 - Q_{n-1}}{\sum_0^{n-1} Q_1} \approx \frac{2 - \alpha}{\alpha} \quad (1)$$

де  $Q$  - величина ваги  $i$ -го розряду. Для окремих  $\alpha$  припустимо відносно відхилення має значення

$\alpha$	2.00	1.90	1.80	1.70	1.62	1.60	1.50
$\delta Q_{CT}(\%)$	0	5.26	11.11	17.65	23.61	25.00	33.33

Підвищення точності аналого-цифрового перетворення на основі НПСЧ здійснюється методами цифрової самокалібровки та самокоригування. У режимі самокалібровки, що може проводитися досить рідко, визначаються реальні значення  $Q_1$ , зміщення нуля  $\Delta A_{ЗМ}$  та масштабний коефіцієнт. При використанні НПСЧ (1,7) цифрові еквіваленти ваги будь-якого  $i$ -го додатного або від'ємного розряду та  $\Delta A_{ЗМ}$  обчислюються за допомогою співвідношень

$$K_j = \sum_{-d}^{1-2} a_j^+ K_j^+ - \sum_{-d}^{1-2} a_j^- K_j^-, \quad (2)$$

$$K_j^- = \sum_{-d}^{1-2} a_j^+ K_j^+ - \sum_{-d}^{1-2} a_j^- K_j^-, \quad (3)$$

$$K_{ЗМ} = \sum_{-d}^{n-m-1} a_j^- K_j^-. \quad (4)$$

де  $a_j^+$  та  $a_j^-$  - розрядні коефіцієнти кодів  $N_j^+$  та  $N_j^-$ , які сформувались у процесі самокалібровки;  $m, l, d$  - параметри розрядної сітки, що визначаються технологічними похибками;  $K_j^+$  - цифрові еквіваленти величин розрядів, що передують  $i$ -му.

Результат перетворення при цьому може обчислюватися одночасно з процесом врівноваження за допомогою співвідно-

шення

$$K(\Delta_{ВХ}) = \sum_0^{n-1} a_j K_j^+ - K_{ЗМ}, \quad (5)$$

де:  $K_1^+ = (K_j, K_j^-)$  та  $K_{ЗМ}^-$  - цифрові еквіваленти, що знайдені на основі (2), (3) та (4). Похибка нелінійності при вико-

нанні вказаних процедур не перевищуватиме

$$\Delta_{\text{НЛ}} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \epsilon_1^2}, \text{ де } \epsilon_1 - \text{ похибка самокалібровки}$$

і-го розряду. При цьому слід зазначити, що абсолютне значення відхилення  $\Delta Q_1$  (особливо для старших розрядів) може бути на 2+3 порядки більше, ніж  $\Delta_{\text{НЛ}}$ . Таким чином, незважаючи на використання в СПІ на основі НПСЧ низькоточної елементної бази, можливо досягнення високого рівня лінійності кодувальної характеристики. При перетворенні вимірювальних аналогових сигналів додатково треба в ході самокалібровки розрахувати масштабний множник  $M$ . Далі значення  $K_j^*$  і  $K_{\text{ЗМ}}$  коригуються по формулам  $\tilde{K}_j = MK_j^*$  і  $\tilde{K}_{\text{ЗМ}} = MK_{\text{ЗМ}}$ . Фіксуються, й використовуються в (5) замість  $K_j^*$  та  $K_{\text{ЗМ}}$ .

При застосуванні НПСЧ (0,1) результат перетворення обчислюється у формі

$$K(A_{\text{ВХ}}) = a_{\text{ЗН}} K_{\text{ЗН}} + \sum_0^{n-1} a_i K_i - K_{\text{ЗМ}}, \quad (6)$$

де:  $a_{\text{ЗН}}$  в (0,1) - двійковий коефіцієнт знакового розряду;  $K_{\text{ЗН}}$  - цифровий еквівалент величини знакового розряду. Розглянутий підхід можна використовувати в СПІ середньої (АШП порозрядного врівноваження) та високої швидкодії (паралельно-послідовні структури). Проте більш вигідним це буде для першого типу перетворювачів, оскільки в цьому випадку проблеми підвищення точності та швидкодії можна розв'язувати комплексно.

Використання НПСЧ при порозрядному аналого-цифровому перетворенні дозволяє скоротити тривалість такту й прискорити врівноваження, а також здійснювати його при змінній рівня  $A_{\text{ВХ}}$  за рахунок можливості комплексувати динамічні похибки I та II

Державний науково-дослідний інститут  
АН України

роду ( $\Delta A_D^I$  та  $\Delta A_D^{II}$ ). Перші обумовлені інерційністю аналогових вузлів тракту перетворення, другі - зміненням  $A_{ВХ}$ . Якщо перехідний процес при формуванні компенсуючого аналогового сигналу  $A_K(t)$  задовольняє схемній функції I порядку, то його значення на молодшому нульовому такті при використанні (1.1) визначається як

$$A_{к.о} = \sum_0^{n-1} a_1 Q_1 - \sum_0^{n-1} a_1 Q_1 e^{-(n-1)t_T/\tau}$$

де  $t_T$  - тривалість такту врівноваження;  $\tau$  - постійна часу. Перша складова формули є статичною і характеризує результат перетворення у вигляді вихідного коду. Друга - динамічна (узагальненою функцією інерційності) і визначає ступінь "відриву" від статичної складової.

Динамічна складова має максимальні значення на певних кодових наборах. Знаходження цих наборів доцільно вести для-ком комп'ютерного моделювання. З цієї метою були розроблені декілька застосовних програм "Моделювання точок розриву". Суть пошуку "особливих" точок (точок розриву або критичних) полягає в перевірці в діапазоні  $A_{ВХ}$  виконання умови лінійності кодувальної характеристики

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta A_{ВР} = A_{ВХ} - \sum_0^{n-1} a_1 Q_1 \leq \Delta A_{ВР.мах}; \\ \Delta A_{КВ} = A_{ВХ}(N'') - A_{ВХ}(N') \leq \Delta A_{КВ.мах} \end{array} \right.$$

де:  $\Delta A_{ВР}$  і  $\Delta A_{КВ}$  - відповідно похибки врівноваження та квантування;  $N'$  і  $N''$  - сусідні кодові комбінації. Перше рівняння визначає інтегральну нелінійність, друге - диференціальну.

Одержана інформація про знайдені "особливі" точки, а також їх графічна інтерпретація використовується при складенні математичних моделей функції поляски усталення  $\delta Q = f(a, n)$ , функції абсолютного  $\Delta A_{ВХ}$  та відносного змінювання вхідного сигналу  $\delta A_{ВХ}$  при умові відповідності нормі  $\Delta A_{Д}^I$  та  $\Delta A_{Д}^{II}$ . У загальному випадку модель  $\delta Q$  зображується у вигляді  $\delta Q = f(\delta Q_1, \delta Q_2, \dots, \delta Q_k)$ , де  $\delta Q_1, \delta Q_2, \dots, \delta Q_k$  - сукупність функцій на окремих підінтервалах  $\Delta a$ . У ході досліджень автором запропоновано кожен функцію  $\delta Q_i$  обчислювати за допомогою відповідного рівняння балансу  $F(x, a, n, M) = 0$ , де  $x$  - неперервне значення похибки усталення,  $M$  - коефіцієнт, що враховує впливові чинники. Рівняння балансу вибирається із послідовності  $F_1(x, a, n, M) = 0; F_2(x, a, n, M) = 0; \dots; F_m(x, a, n, M) = 0$  як така, що дає найменшу похибку в обчисленнях  $\delta Q$ . Складення рівнянь балансу проводиться на основі аналізу діаграм врівноваження в "особливих" точках. Для сусідніх кускових функцій  $\delta Q_j$  та  $\delta Q_{j+1}$  розраховуються вузлові точки  $a_j$  шляхом спільного розв'язання рівнянь  $F_j(x, a, n, M) = 0$  та  $F_{j+1}(x, a, n, M) = 0$ . Розроблений формалізований алгоритм складення математичної моделі  $\delta Q$  у поєднанні з процедурою складення рівнянь балансу утворюють методику досліджень динамічних похибок першого роду порозрядного аналого-цифрового перетворення на основі НПСЧ.

Третя глава присвячена розробці основ теорії прискореного самокомпенсуючого та форсованого аналого-цифрового перетворення із застосуванням НПСЧ. У випадку використання НПСЧ  $(1, T)$  прискорені самокомпенсуюче та форсоване перетворення здійснюються за алгоритмом "тільки вмикання". Графічна інтерпретація прискореного самокомпенсуючого врівноваження приве-

дана на рисунку 1,а. Математична модель похибки усталення при цьому зображується у формі

$$\delta Q(\alpha, n) = \begin{cases} \delta Q_1, & \text{якщо } \alpha_1 \leq \alpha \leq 2.0; \\ \delta Q_2, & \text{"-" } \alpha_2 \leq \alpha < \alpha_1; \\ \dots \\ \delta Q_7, & \text{"-" } 1.35 < \alpha < \alpha_6, \end{cases} \quad (7)$$

де значення  $\delta Q_1, \delta Q_2, \dots, \delta Q_7$  обчислюються за допомогою сукупності рівнянь балансу  $F_1(x, \alpha, n) = 0, F_2(x, \alpha, n) = 0, \dots, F_7(x, \alpha, n) = 0$ , котрі мають вигляд відповідно:

$$x\alpha^{n-1}(1-x^{n-2}) + \sum_0^{n-3} x^1 \alpha^1 x^{n-2} \alpha^{n-2} - \sum_0^{n-3} \alpha^1 + \alpha^{n-2} - 1.5 = 0;$$

$$(x\alpha^{n-2} + x^2 \alpha^{n-1})(1-x^{n-3}) + \sum_0^{n-4} x^1 \alpha^1 x^{n-3} \alpha^{n-3} - \sum_0^{n-4} \alpha^1 + \alpha^{n-3} - 1.5 = 0;$$

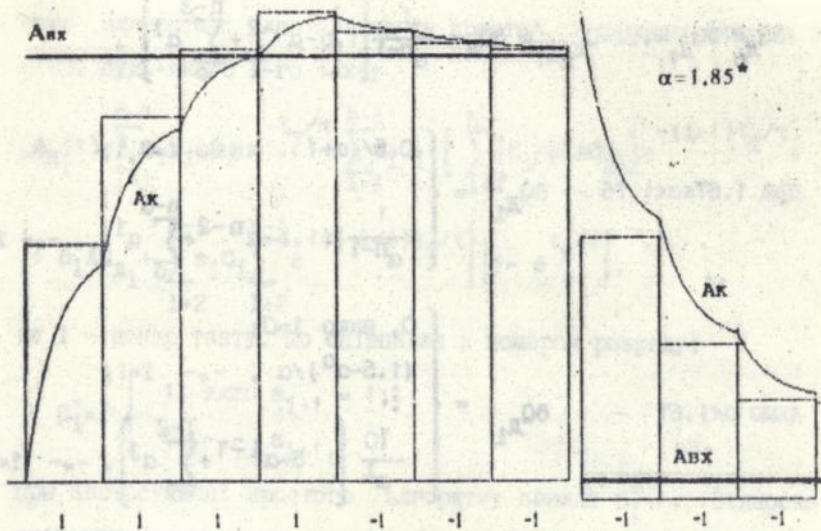
⋮

$$\alpha \left( \sum_1^4 x^1 \alpha^1 - \sum_5^9 x^1 \alpha^1 + \sum_{10}^{12} x^1 \alpha^1 \right) (1-x^2) + x(1-x\alpha) + \alpha - 2.5 = 0.$$

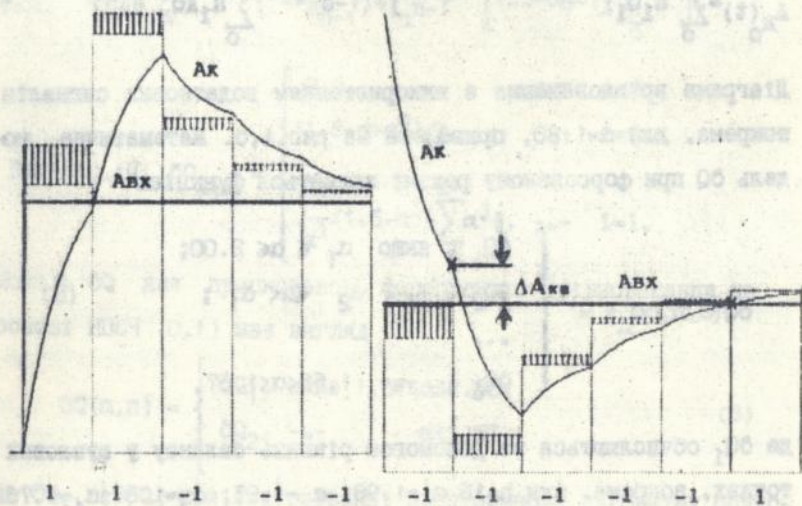
У вузлових точках значення  $\alpha$ , зокрема, при  $n=16$  дорівнюють  $\alpha_1 \approx 1.99; \alpha_2 \approx 1.96; \alpha_3 \approx 1.79; \alpha_4 \approx 1.76; \alpha_5 \approx 1.73; \alpha_6 \approx 1.62$ .

Суть прискореного форсованого врівноваження полягає в тому, що на кожному 1-му такті, починаючи зі старшого  $(n-1)$ -го, на час тривалості такту вмикається додатковий (форсуєчий) аналоговий сигнал  $\Delta Q_{Д1}$ , який підсумовується по модулю з основним. Це дозволяє збільшити крутизну зростання компенсуючого сигналу. Значення форсуєчого сигналу  $\Delta Q_{Д}$  повинно задовольняти співвідношенням:

на інтервалі  $1.76 \leq \alpha < 2.00$  -



а)



б)

Рис.1. Діаграми аналого-цифрових врівноважень на основі НПСЧ:  
а) самокомпенсуюче, б) форсоване

$$\delta Q_{D_0} = \delta Q_{D_1} = \dots = \delta Q_{D_{n-1}} = \delta Q_D = \frac{1}{\alpha^{n-1}} \left[ 1.5 - \alpha^{n-2} + \sum_0^{n-3} \alpha^j \right].$$

при  $1.67 \leq \alpha < 1.76$  - 
$$\delta Q_{D_1} = \begin{cases} 0.5/(\alpha+1), & \text{якщо } l=0,1; \\ \frac{1}{\alpha^{n-1}} \left( 1.5 - \alpha^{n-2} + \sum_0^{n-3} \alpha^j \right), & \text{--- } l \geq 2. \end{cases}$$

якщо  $\alpha < 1.67$  - 
$$\delta Q_{D_1} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } l=0; \\ (1.5 - \alpha^0)/\alpha, & \text{--- } l=1; \\ \vdots \\ \frac{1}{\alpha^l} \left[ 1.5 - \alpha^{l-1} + \sum_0^{l-2} \alpha^j \right], & \text{--- } l=1. \end{cases}$$

Значення компенсуючого сигналу на молодшому (нульовому) такті

$$A_{K_0}(t) = \sum_0^{n-1} a_1 Q_1 \left[ 1 - e^{-(n-1) - t_T/\tau} \right] + (1 - e^{-t_T/\tau}) \sum_0^{n-1} a_1 \delta Q_{D_1} e^{-(n-1-1)t_T/\tau}.$$

Діаграма врівноваження з використанням додаткових сигналів, зокрема, для  $\alpha=1.80$ , приведена на рис.1,б. Математична модель  $\delta Q$  при форсованому режимі задається функцією

$$\delta Q(\alpha, n, \delta Q_D) = \begin{cases} \delta Q_1, & \text{якщо } \alpha_1 \leq \alpha < 2.00; \\ \delta Q_2, & \text{--- } \alpha_2 \leq \alpha < \alpha_1; \\ \dots \\ \delta Q_6, & \text{--- } 1.55 < \alpha < 1.67. \end{cases} \quad (8)$$

де  $\delta Q_1$  обчислюється за допомогою рівнянь балансу у вузлових точках, зокрема, при  $n=16$   $\alpha_1 \approx 1.98$ ;  $\alpha_2 \approx 1.97$ ;  $\alpha_3 \approx 1.88$ ;  $\alpha_4 \approx 1.76$ .

При застосуванні НПСЧ (0,1) прискорене самокомпенсуюче врівноваження не є можливим. Для підвищення швидкості перетворення при цьому використовуються два різновиди форсова-

ного алгоритму: адаптований та простий. У першому випадку в кінці будь-якого 1-го такту

$$A_{K_1}(t) = \sum_{l=1}^{n-1} a_l Q_l + Q_1 \cdot e^{-t_T/\tau} \cdot \sum_{l=1}^{n-1} a_l Q_l + \left[ \sum_{l=1}^{n-1} (Q_l + \beta_1^* A Q_{l1}) e^{-(1-l)t_T/\tau} + \beta_1^* A Q_{l1} + \sum_{l=2}^{n-1} a_l Q_l \sum_{l=2}^{n-1} e^{-(j-1-l)t_T/\tau} \right] (1 - e^{t_T/\tau}),$$

де  $l$  - номер такту, що співпадає з номером розряду;

$$\beta_1^* = \begin{cases} 1, & \text{якщо } a_{l+1} = 1; \\ 0, & \text{якщо } a_{l+1} = 0. \end{cases}$$

При застосуванні простого алгоритму завжди  $\beta_1^* = 1$ . Відносне значення форсувального сигналу на інтервалі  $1.67 \leq \alpha < 2.00$  дорівнює

$$\delta Q_{D_0} = \delta Q_{D_1} = \dots = \delta Q_{D_{n-1}} = \frac{1}{\alpha^{n-1}} \left[ 1.5 \cdot \alpha^{n-1} + \sum_0^{n-2} \alpha^l \right].$$

$$\text{При } \alpha < 1.67 \quad \delta Q_{D_1} = \begin{cases} 0.5, & \text{якщо } l=0; \\ (1.5 - \alpha + \alpha^0) / \alpha, & \text{якщо } l=1; \\ \dots \\ \frac{1}{\alpha^l} (1.5 - \alpha^l + \sum_0^{l-1} \alpha^j), & \text{якщо } l=1. \end{cases}$$

Модель  $\delta Q$  для прискореного форсованого врівноваження на основі НПСЧ (0,1) має вигляд

$$\delta Q(\alpha, n) = \begin{cases} \delta Q_1, & \text{якщо } 1.67 \leq \alpha < 2.00; \\ \delta Q_2, & \text{якщо } \alpha < 1.67, \end{cases} \quad (9)$$

де  $\delta Q_1$  та  $\delta Q_2$  при застосуванні адаптованого алгоритму обчислюються розв'язанням рівнянь балансу відповідно

$$[x(1 + \delta Q_{D1}) - \delta Q_{D1}] [(1-x^{n-1})\alpha^{n-1} - x^{n-2}\alpha^{n-2}] + x(\alpha-1) \sum_0^{n-3} x^l \alpha^l - 0.5 = 0,$$

$$x(\alpha-1) \sum_0^{n-2} x^1 \alpha^1 + x^{n-1} \alpha^{n-1} [\delta Q_{д.п-1} - x(1 + \delta Q_{д.п-1})] - 0.5 = 0.$$

У випадку простого алгоритму завдання форсуемого сигналу здійснюється у формі  $\delta Q^* = M \delta Q_{д}$ . Причому значення  $M$  знаходиться спільним розв'язанням пар рівнянь балансу - "прямого" та "інверсного". Графічна інтерпретація функціональних залежностей  $\delta Q = f(\alpha)$  приведена на рис. 2, в. Тут криві А і D відповідають форсованому та самокомпенсуючому врівноваженню на основі НПСЧ (1,  $\bar{T}$ ), В і С - врівноваженню на основі НПСЧ (0, 1) за адаптованим та простим алгоритмами. Найкращий показник  $\delta Q$  має прискорене форсоване врівноваження на основі НПСЧ (1,  $\bar{T}$ ).

У четвертій главі досліджується прискорене аналого-цифрове перетворення в умовах дії додаткових чинників. Одним із додаткових чинників в режим багатократного врівноваження, коли тривалість паузи  $t_{п}$  може бути обмеженою. При цьому виникає ситуація, при якій перед початком чергового врівноваження  $A_K(t) \neq 0$ , тобто мають місце ненульові початкові умови. Це певним чином впливає на характер перетворення, яке складається із врівноваження та паузи. У випадку застосування прискореного самокомпенсуючого алгоритму на основі НПСЧ (1,  $\bar{T}$ ) числові значення  $\delta Q$  при однократному та багатократному врівноваженнях відрізняються незначно. При форсованому перетворенні на основі НПСЧ (1,  $\bar{T}$ ) чинник ненульових початкових умов впливає більш істотно, зменшуючи  $\delta Q$ .

Введення в паузі додаткового сигналу, відносно значення якого для НПСЧ (1,  $\bar{T}$ ) задається співвідношенням

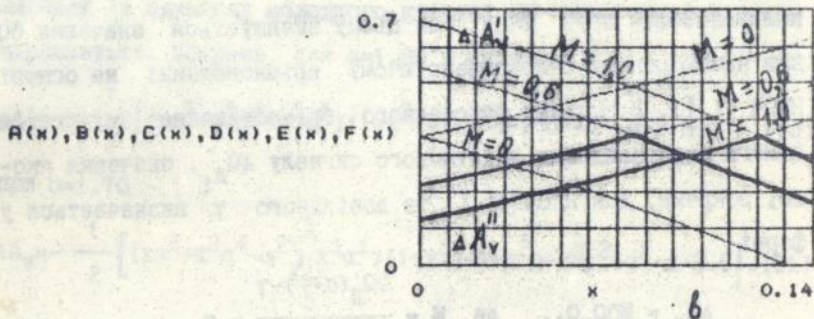
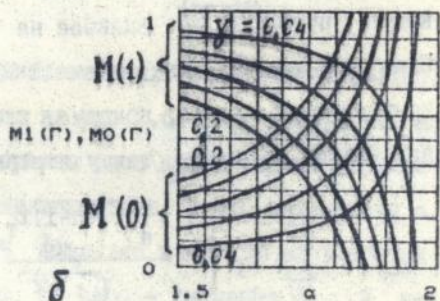
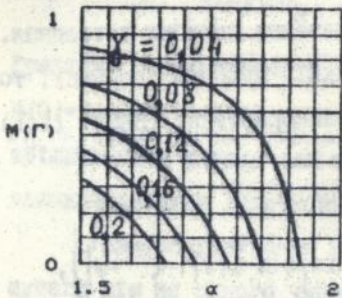
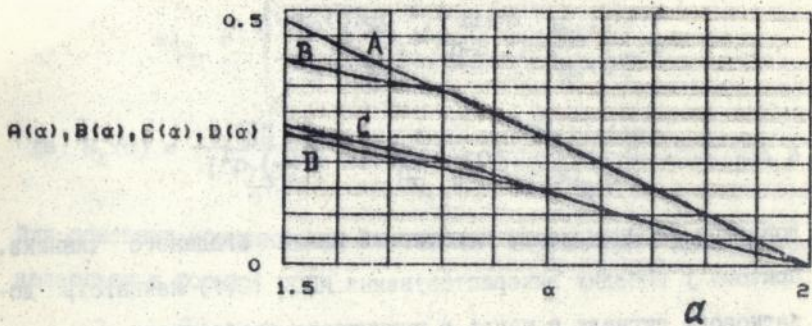


Рис. 2 Функціональні залежності: а)  $\delta Q = f(\alpha)$ ; б)  $M(0) = f(\alpha), M(1) = f(\alpha), M = f(\alpha)$ ; в)  $\Delta A'_{V}, \Delta A''_{V}$

$$\delta Q_{ДП} = \frac{1}{\alpha^n} (1.5 - \alpha^{n-1} + \sum_0^{n-2} \alpha^1).$$

а для НПСЧ (0,1) 
$$\delta Q_{ДП} = \frac{1}{\alpha^n} (1.5 - \alpha^n + \sum_0^{n-1} \alpha^1),$$

дозволяє скомпенсувати негативний вплив згаданого чинника. Причому у випадку використання НПСЧ (0,1) наявність додаткового сигналу в паузі є принципово необхідною.

Характер перехідного процесу під час врівноваження також є чинником, що впливає на значення похибки усталення. Якщо він задовольняє схемній функції другого порядку, то компенсуючий сигнал, зокрема, при використанні НПСЧ (1,1) наприкінці молодшого такту дорівнює

$$A_{K_0}(t) = \sum_0^{n-1} a^1 Q_1 \left\{ 1 + \frac{e^{-\xi \omega (n-1) t_T}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin[\omega (n-1) t \sqrt{1 - \xi^2} + \varphi] \right\}.$$

де  $\xi$  - коефіцієнт відносного згасання,  $\omega$  - частота власних коливань,  $\varphi$  - зсув фази. При цьому зменшуються значення  $\delta Q$  при прискореному самокомпенсуючому врівноваженні на основі НПСЧ (1,1). У випадку форсованого врівноваження змінюються вимоги щодо завдання додаткового сигналу  $\Delta Q_{Д1}$ , значення якого, зокрема, для НПСЧ (1,1) та довільного  $\gamma$  визначається у формі

$$\Delta Q_{Д1} = M \delta Q_{Д} Q_1, \quad \text{де } M = \frac{\delta Q_{Д} (\alpha + 1) - \gamma}{\delta Q_{Д} (1 + \gamma)} - \alpha.$$

При застосуванні НПСЧ (0,1) додатковий сигнал у паузі залежить від полярності  $A_{ВХ}$  при попередньому перетворенні й визначається у вигляді

$$\Delta Q_{ДП} = \begin{cases} M_{П}(0)Q_{П} & , \text{ якщо } \Lambda_{ВХ} > 0; \\ M_{П}(1)Q_{П} & \text{---} \Lambda_{ВХ} < 0. \end{cases}$$

$$\text{де } M_{П}(0) = \frac{\gamma}{(1+\gamma)\delta Q_{Д}} \quad , \quad M_{П}(1) = \frac{1-(\alpha-1)(1+\gamma)}{(1+\gamma)\delta Q_{Д}(\alpha-1)}.$$

Для основних компенсуючих сигналів відповідні коефіцієнти задаються у формі

$$M(0) = \gamma \frac{\alpha(1+\delta Q_{Д})-1}{(1+\gamma)\delta Q_{Д}} \quad , \quad M(1) = \frac{\delta Q_{Д} - \gamma}{(1+\gamma)\delta Q_{Д}}.$$

Графічна інтерпретація функціональних залежностей  $M=f(\alpha)$ ,  $M(0)=f(\alpha)$ ,  $M(1)=f(\alpha)$  приведена на рис.2,б. Слід зазначити, що збільшення  $\gamma$  змушує для створення умов прискореного врівноваження вводити додаткову надлишковість, тобто зменшувати  $\alpha$ .

Використовування НПСЧ дозволяє в певній мірі компенсувати дію ще одного чинника, а саме - змінення  $\Lambda_{ВХ}$ . У випадку застосування НПСЧ (1,Т) абсолютне змінення вхідного сигналу (в одиницях молодшого кванта) за час врівноваження виражається, зокрема, для  $\alpha=1.80$  у вигляді

$$\Delta \Lambda_{V} = - \frac{1}{3} \left[ (\alpha x^3 + x^2 \alpha^4 - x^3 \alpha^5)(1-x^3) + x + x^2 \alpha - x^3 \alpha^2 + \alpha^2 - \alpha - 2.5 \right], \quad (10)$$

при  $\alpha=1.70$  -

$$\Delta \Lambda_{V} = - \frac{1}{2} \left[ (\alpha x^3 + x^2 \alpha^4 - \alpha^2 \sum_3^5 x^1 \alpha^1)(1-x^3) + x + x^2 \alpha - x^3 \alpha^2 + \alpha^2 - \alpha - 2.5 \right]. \quad (11)$$

Для розширеного інтервалу  $\alpha$  має місце набір частинних моделей  $\Delta \Lambda_{V}$ . При форсованому врівноваженні ( $M>0$ ) має місце по два типи функціональних залежностей  $\Delta \Lambda_{V}=f(x, \alpha, M)$ . Графічна інтерпретація цих функцій приведена на рис.2,в. Тут криві

сім'ї  $\Delta A'_V = f(x, M)$  зі зростанням  $x$  нахилені донизу, а сім'ї  $\Delta A''_V = f(x, M)$  піднімаються догори. Причому ліворуч від точки перетину цих функцій треба користуватись  $\Delta A''_V$ , а праворуч -  $\Delta A'_V$ .

Якщо вхідний сигнал змінюється за експоненціальним законом або осцилює зі згасанням по експоненціальній обвідній, то при прискореному самокомпенсуючому врівноваженні на основі НПСЧ (1,1) припустимо відносне змінення  $A_{ВХ}$  визначається у формі

$$\Delta A_{ВХ} = \frac{\sum_0^{n-4} \alpha^1 - \alpha^{n-3} - (x^2 \alpha^{n-1} + x \alpha^{n-2})(1-x^{n-2}) - x \left( \sum_0^{n-4} x^1 \alpha^1 - x^{n-3} \alpha^{n-3} \right)}{\alpha^{n-3}}$$

При форсованому режимі врівноваження на основі НПСЧ (1,1) треба використовувати по два рівняння: "прямого" та "інверсного". У випадку НПСЧ (0,1) при додатному  $\Delta A_{ВХ}$  для розрахунку  $\Delta A_{ВХ}$  треба мати чотири відповідних рівняння.

Постійна часу  $A_{ВХ}$  не може перевищувати значення

$$\tau_c \leq (n-m-2)t_T \cdot \left[ \ln \frac{\Delta A_{ВХ}}{m \Delta A_V} \right]^{-1}$$

де  $m$  - кількість останніх тактів, які є критичними для точного врівноваження.

П'ята глава присвячена розробці методики рекомендацій по проектуванню високоточних швидкодіючих систем цифрової реєстрації й обробки аналогової інформації на основі самокалібруючих і самокоригуючих АЦП і ЦАП, а також аналогових вузлів вказаних СПІ на перспективній елементній базі.

Для розв'язання задачі ефективного вибору НПСЧ доцільним є побудова критеріїв типу критеріїв кваліметрії, що мають

вигляд  $Q = (\text{Ефект})/(\text{Витрати})$ . Позитивний ефект при застосуванні НПСЧ полягає в підвищенні точності, а також у забезпеченні прискореного перетворення. У ролі витрат виступає подовження розрядної сітки АЦП, що призводить до збільшення обладнання, особливо в рамках аналогової частини. Кількісне оцінювання ефекту зручно здійснювати через коефіцієнт підвищення швидкодії у вигляді

$$\gamma_{\text{ш}} = \frac{t_{\text{пр.2}}}{t_{\text{пр.а}}},$$

де  $T_{\text{пр.а}}$  та  $T_{\text{пр.2}}$  - час перетворення відповідно для НПСЧ та двійкової системи числення. Якщо перехідний процес при формуванні  $A_K(t)$  відповідає, зокрема, схемній функції першого порядку, то

$$\gamma_{\text{ш}} = - \frac{(n+1) \cdot \ln \alpha}{\ln(\delta Q - \delta Q_{\text{ст}})}, \quad \text{де: } \delta Q \text{ знаходиться на}$$

основі (7), (8), (9), а  $\delta Q_{\text{ст}}$  визначається відхиленнями (технологічними похибками) ваги розрядів ЦАП від потрібних значень. В цілому критерій ефективності з урахуванням витрат (коефіцієнта подовження розрядної сітки  $\gamma_n$ ) має вигляд

$$\gamma_e = \frac{\gamma_{\text{ш}}}{\gamma_n} = - \frac{(n+1) \cdot \ln^2 \alpha}{\ln 2 \cdot \ln(\delta Q - \delta Q_{\text{ст}})},$$

а з урахуванням часу затримки спрацьовування цифрового автомата ( $t_{\text{ц}}$ ) при врівноваженні -

$$\gamma_{e.ц.} = \frac{\gamma_{\text{ш.ц}}}{\gamma_n} = \frac{n(t_2 + t_{\text{ц}})}{n_{\alpha}(t_{\alpha} + t_{\text{ц}})\gamma_n},$$

де:  $t_2$  - тривалість такту для двійкової системи числення;  $t_\alpha$  - тривалість такту НПСЧ;

У випадку змінення  $\Delta_{ВХ}$  разом із загальним критерієм  $\gamma_\theta$  слід використовувати й частинний, який дає змогу оцінювати ефективність роботи АЦП і в цьому режимі. Вказаний критерій побудовано у вигляді

$$\gamma_v = \frac{\Delta_{ВХ\alpha}}{\Delta_{ВХ2}} \cdot \gamma_{\text{ш}} \quad \text{де } \Delta_{ВХ\alpha} \text{ та } \Delta_{ВХ2} -$$

припустимі абсолютні значення  $\Delta_v$  відповідно для НПСЧ, які розраховуються за допомогою (10), (11) та для двійкової системи числення.

Графічна ілюстрація функціональних залежностей  $\gamma_{\text{ш}}=f(\alpha, n)$ ,  $\gamma_\theta=f(\alpha, n)$ ,  $\gamma_v=f(\alpha, t_T)$ ,  $\gamma_v=f(n, t_T)$ ,  $\gamma_{\text{ш.ц}}=f(\alpha, \theta)$  приведена на рисунку 3, відповідно а, б, в, г, д, е. Причому рис. 3, в інтерпретує самокомпенсуєче врівноваження; г та д - форсування. Функція  $\gamma_{\text{ш}}=f(\alpha, n)$  зростає по мірі зменшення  $\alpha$  та збільшення  $n$ . Криві сім'ї  $\gamma_\theta=f(\alpha, n)$  мають максимуми на інтервалі  $1.65 < \alpha < 1.70$ . Вибір такого значення  $\alpha$  дозволяє підвищувати точність та досягати максимального підвищення швидкодії з мінімальними додатковими витратами обладнання. На основі використання побудованих критеріїв розроблена методика ефективного вибору НПСЧ при проектуванні високоточних швидкодіючих АЦП.

Застосування АЦП і ЦАП на основі НПСЧ дозволяє підвищити точність та швидкість систем цифрової реєстрації та обробки аналогової інформації. При цьому способи цифрової самокалібровки й самокоригування статичних похибок, а також компенсації динамічних похибок розповсюджуються на вузли, що входять до складу наскрізних трактів аналого-цифрового перетво-

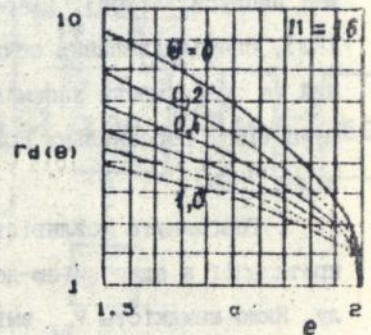
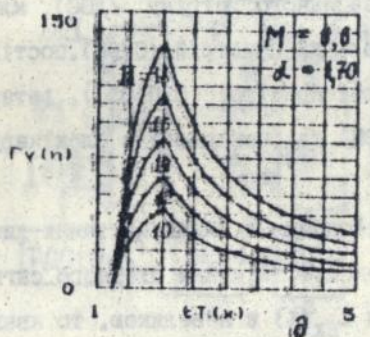
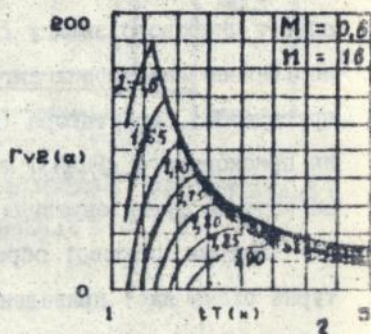
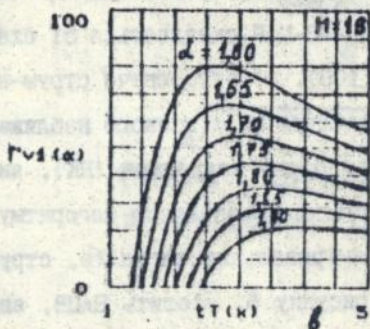
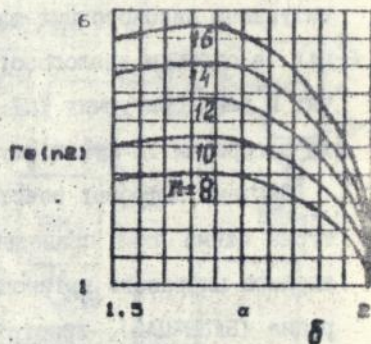
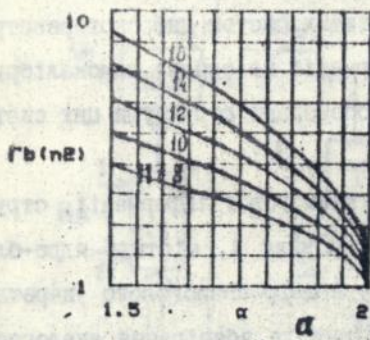


Рис. 3 Функциональные зависимости: а)  $\delta_{\omega} = f(\alpha, n)$ ; б)  $\delta_e = f(\alpha, n)$ ; в) 1)  $\delta_v = f(t_T, \alpha)$ ; 2)  $\delta_v = f(t_T, n)$ ; г)  $\delta_{\omega, \omega} = f(\alpha, \theta)$

рення. У ході досліджень були розроблені рекомендації по проектуванню високоточних швидкодіючих систем цифрової реєстрації та обробки аналогової інформації на основі самокалібруючих й самокоригуючих СПІ, запропоновані структури цих систем та алгоритми їх функціонування.

Система цифрової реєстрації аналогової інформації, структурна схема якої приведена на рисунку 4, містить ядро-блок аналого-цифрового врівноваження й цифровоаналогового перетворення (БАЦВ-ЦАП), пристрій вибірки та зберігання аналогових сигналів (ПВЗ), аналогові комутатори (K1, K2), фільтр (Ф), апарат цифрового запису (АЦЗ). БАЦВ-ЦАП складається зі схеми порівняння аналогових сигналів (СП), перетворювача струм-напруги (ПЧН), комутатора (К), регістра послідовного наближення прискореного (РІНП), а також блока керування (БК), який забезпечує функціонування відповідно до заданого алгоритму.

Система цифрової обробки виміривальних сигналів, структурна схема якої приведена на рисунку 5, містить БАЦВ, аналогові комутатори (K1, K2), термостабілізоване джерело опорної напруги (ТДОН), джерело зарядного струму (ДЗС), ключ (Кл), спеціалізований обчислювальний пристрій (СЦОП), постійний та оперативний запам'ятовувачі пристрої (ПЗП, ОЗП), інтерфейс (ІФ), персональну ЕОМ (ПЕОМ) та центральний блок керування (ЦБК).

Розглянута можливість здійснення в даних системах дискретизації з адаптацією до швидкості змінення вхідного сигналу. Якщо швидкість  $V_{вх}$  змінення  $A_{вх}(t)$  є невеликою, то квантування його можна здійснювати шляхом прискореного аналого-цифрового перетворення на основі НПСЧ без ПВЗ, наявність якого призводить до появи додаткових похибок. Між параметра-

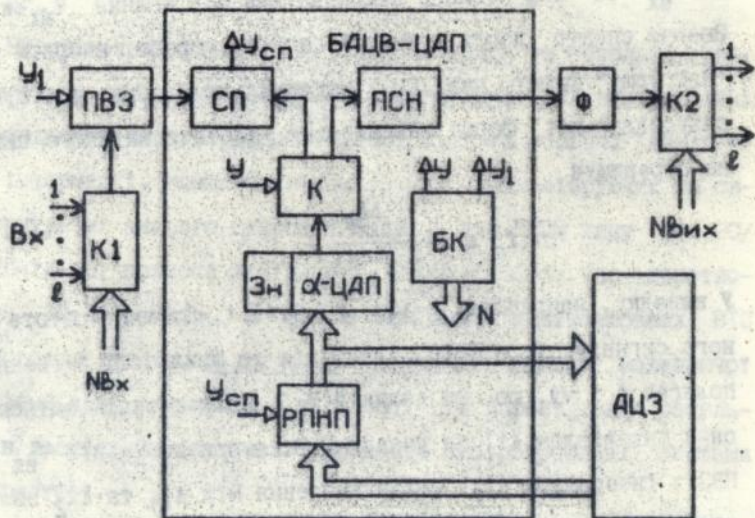


Рис. 4 Система цифрової ресстрації аналогової інформації

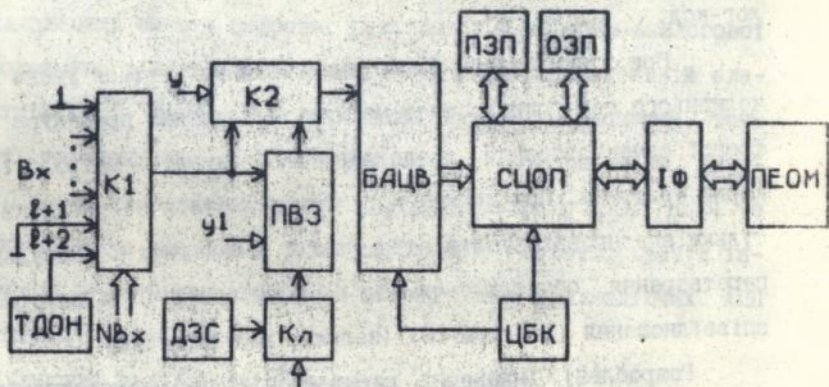


Рис. 5 Система цифрової обробки вимірвальних сигналів

ми  $V_{ВХ}$  та  $\Delta A_V$  повинно виконуватися нерівняння  $V_{ВХ} < \Delta A_V / t_T$ . Знаючи спектр досліджуваного сигналу, треба вибрати його "найгіршу" форму, яка дає максимальну  $V$ . При домінуванні синусоїдальної форми максимальна частота вхідного сигналу не перевищує

$$f_c \leq \frac{\Delta A_V}{\pi 2^{p+1} t_T}$$

У випадку, наприклад,  $p=12$ ;  $\Delta A_V=0.4$ ;  $t_T=0.1\mu\text{с}$  частота вхідного сигналу  $f_{ВХ} \leq 156\text{Гц}$ . Адаптація до швидкості змінення  $A_{ВХ}$  полягає в тому, що при великій  $V_{ВХ}$  дискретизація здійснюється з інтервалом  $\Delta t_1$  за участю ПБЗ, а при повільній  $V_{ВХ}$  - без ПБЗ з інтервалом  $\Delta t_2$ . Співвідношення між  $\Delta t_1$  та  $\Delta t_2$  залежить від того, де зосереджена основна інформація. Мінімальний час дискретизації для великої  $V_{ВХ}$  визначається співвідношенням  $\Delta t_{1\text{min}} = T_{\text{пер}} + t_{\text{в}} - t_{\text{н}}$ , де  $t_{\text{н}}$  - припустимий час накладання, а для малої  $V_{ВХ}$ , коли ПБЗ не використовується, -  $\Delta t_{2\text{min}} = T_{\text{пер}}$ . При  $\alpha=2.0$   $t_{\text{н}}=0$ . Вилучення ПБЗ зменшує похибку перетворення аналог-код.

При функціонуванні системи, коли змінюються умови навколишнього середовища, систематичне проведення процедури цифрової самокалібровки дозволяє стабілізувати метрологічні характеристики. При цьому коригуються статичні похибки не тільки аналогових вузлів ядра, але й "зовнішніх". Результат перетворення обчислюється або в СЦОП, або в ПЕОМ на основі співвідношення (5), або (6) (залежно від типу НПСЧ).

Розроблені інженерні рекомендації по схемотехнічному проектуванню аналогових вузлів СПІ на основі НПСЧ із реалізацією на перспективній елементній базі у вигляді напівзамовних ВІС, зокрема, типу базових матричних кристалів "Фар-

хад-2".

Використання вищевказаних рекомендацій та методики дозволило спроектувати, розробити й виготовити ряд високоточних швидкодіючих систем цифрової реєстрації та обробки аналогової інформації, комплект високоточних самокалібруючих та самокоригуваних аналого-цифрових модулів для ПЕОМ типу IBM PC/AT (n=14-18; похибка лінійності- 0.002+0.005%; час перетворення 10+200 мкс), а також комплект напівзавомних ВІС аналогових вузлів. У додатках наведені: лістинг моделюючої програми, дані моделювання, відомості про впровадження результатів досліджень, а також інформацію про розроблені системи та пристрої.

### 3. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблені теорія аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення та інженерні методики проектування високоточних швидкодіючих систем цифрової реєстрації й обробки аналогової інформації, а також аналогових вузлів на перспективній елементній базі. Комплексне вирішення проблем підвищення точності та швидкості аналого-цифрового перетворення за рахунок введення інформаційної надлишковості у формі НПСЧ є новим вагомим внеском у розвиток теорії перетворювачів інформації в напрямку створення високоточних швидкодіючих АЦП системного застосування.

Основні результати досліджень є такими:

1. Розроблені й проаналізовані способи підвищення точності АЦП середньої та високої швидкодії. Показано, що запропоновані принципи самокалібровки та самокоригування ста-

тичних похибок є найбільш вигідними для порозрядного аналого-цифрового врівноваження, оскільки при цьому проблеми підвищення точності та швидкодії розв'язуються комплексно.

2. Розроблені методика й формалізований алгоритм досліджування динамічних похибок I та II роду, а також методика й алгоритм складення математичних моделей похибок усталення компенсуючого аналогового сигналу в процесі врівноваження.

3. Запропоновані та проаналізовані способи прискореного самокомпенсуючого й форсованого аналого-цифрового перетворення за умов дії впливових чинників: режиму багатократного врівноваження, коливального усталення компенсуючого й змінення рівня вхідного сигналів. Складені математичні моделі похибок усталення для випадків, коли перехідний процес при формуванні компенсуючого сигналу відповідає схемним функціям I та II порядків. Доведено, що форсоване врівноваження є більше швидкісним, ніж самокомпенсуюче.

4. Отримане сім'я аналітичних співвідношень, що визначають параметри вхідного сигналу при змінюванні його за лінійним законом, а також відповідно до схемних функцій I та II порядків. Показано, що в другому випадку при форсованому врівноваженні вигідніше використовувати НПСЧ (1, I), оскільки це дозволяє збільшити швидкість змінення вхідного сигналу.

5. Розроблена методика та побудовані критерії ефективного вибору НПСЧ при комплексному вирішенні задач підвищення точності та швидкодії АЦП системного застосування. Показано, що використання цих критеріїв дозволяє розв'язати вказані задачі з мінімальними додатковими витратами обладнання.

6. Розроблені рекомендації по проектуванню високоточних швидкодіючих систем цифрової реєстрації й обробки аналогової

інформації з використанням АЦП і ЦАП на основі НПСЧ. Показано, що запропонований підхід дозволяє в комплексі підвищувати точність та швидкодію наскрізних трактів аналого-цифрового та цифроаналогового перетворення, а також забезпечує стабілізацію метрологічних характеристик при зміні умов зовнішнього середовища.

7. Розроблені інженерні рекомендації по схемотехнічному проектуванні й розробці аналогових вузлів високоточних швидкодіючих систем цифрової реєстрації й обробки аналогової інформації. Показана можливість реалізації, зокрема, високочутливих швидкодіючих схем порівняння струмів, перетворювачів код-струм, високолінійних швидкісних ППС у вигляді напівзамовних ВІС.

8. Результати виконаних досліджень впроваджені на підприємствах України й Росії при проектуванні й розробці багатоканальної інформаційно - вимірвальної системи (ПАСМ-120), автоматизованого аналізатора параметрів трактів звукового мовлення, комплекту високоточних швидкодіючих самокоригуючих аналого-цифрових модулів та вимірвальних блоків, а також - у навчальний процес у Вінницькому державному технічному університеті.

#### 4. ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

Матеріали досліджень викладено в 103 роботах, основними з яких є:

1. Высокопроизводительные преобразователи информации на основе избыточных систем счисления: Учеб. пособие / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. П. Мерценник и др. - К.: УМК, 1988. - 180 с.

2. Азаров А. Д. Избыточные позиционные системы счисления в

технике преобразования информации // Избыточные системы счисления, моделирование, обработка данных и системное проектирование в технике преобразования информации: Учебн. пособие - К.: Вища школа, 1990. - С. 62-105.

3. Азаров О.Д. Прискоренне аналого-цифрове перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 1993.-№1.-С.22-27.

4. Азаров А.Д. К вопросу об оценке надежности преобразователей информации на основе кодов с иррациональными основаниями // Методы построения алгоритмических моделей сложных систем. Выпуск 4. Таганрог, ТРТИ, 1979. - С. 146-149.

5. Азаров А. Д., Крютченко Е. В., Моисеев В. И. Преобразователи информации в кодах с иррациональными основаниями /Препринт: ОЭА 17-184, Ин-т физики высоких энергий, Серпухов, 1979. - 13 с.

6. Стахов А. П., Азаров А. Д., Рубин А. Г. О возможности создания надежных преобразователей информации на основе кодов с иррациональными основаниями // Управляющие системы и машины, №4, 1980. - С. 49-53.

7. Азаров А.Д. Эффективность применения избыточных измерительных кодов в высокопроизводительных преобразователях информации IV поколения // Сб. ст. Всесоюз. конф.: Новые методы и средства вычислительной техники / Тбилиси.: Сабчота Сакартвело, 1985. - С. 48-54.

8. Азаров А.Д. Интеллектуальные преобразователи формы информации на основе избыточных систем счисления // Матер. Всесоюз. конф.: Функциональная оптоэлектроника в вычислительной технике и устройствах управления / Тбилиси.: Сабчота Сакартвело, 1986. - С. 279-283.

9. Азаров А. Д. О возможности повышения линейности АЦП и ЦАП на основе кодов с иррациональными основаниями // IV Всесоюз. симпозиум: Проблемы создания преобразователей формы информации : Тез. докл. - К., 1980.-С. 7-10.

10. Азаров А.Д. Выбор оптимального основания избыточного кода для высокопроизводительных АЦП // V Всесоюз. симпозиум: Проблемы создания преобразователей формы информации: Тез. докл. - К., 1984.-С.56-58;

11. Стахов А.П., Азаров А.Д., Моисеев В.И. и др. Аналого-цифровые преобразователи на основе избыточных систем счисления // Помехоустойчивые коды. - М.:Знание, 1989. - 64с. Сер.Радиовлектроника и связь. №9.

12.Высокоточный самокорректирующийся аналого-цифровой преобразователь на основе кодов с иррациональными основаниями/ А.П.Стахов, А.Д.Азаров, В.И.Моисеев и др.-Киев:ИК АН УССР, 1982.-35с.

13. Азаров А.Д. Высокопроизводительные стабильные преобразователи формы информации на основе избыточных измерительных кодов//VII Всесоюз. конф. ИИС-85. Тез. докл. -Винница, 1985.-С.193-194.

14.Азаров А.Д. Моделирование быстродействующих алгоритмов аналого-цифрового преобразования на основе избыточных систем счисления // Н.тех. конф. стран СНГ: Контроль и управление в технических системах:Тез. докл. Винниц.политех.ин-т., 1992.-С.148-149.

15. Азаров А.Д. Проектирование самокорректирующихся быстродействующих преобразователей информации на основе оптимальных избыточных систем счисления // Тез. докл. VII Международного симпозиума: Проблемы создания преобразователей форм-

мы информации / Киев, 1992.-С.9-10.

16. Азаров А.Д. Разработка отказоустойчивых быстродействующих АПП на основе избыточных позиционных систем счисления // Респ.конф. Вопросы проектирования и практического использования ПФИ в управляющих и вычислительных комплексах: Тез. докл.Одесса.,1990.-С.140-142.

17. Марценюк В.П., Азаров А.Д. Некоторые свойства модифицированных позиционных кодов и особенности их использования в технике АЦ и ЦА-преобразования // Межвуз.сб.н.тр-в.: Автоматизация измерений/Рязанск.радиотехн.ин-т.,1982.-С.46-52.

18.Марценюк В.П., Азаров А.Д., Коваль О.В. Метод снижения динамической погрешности АПП // Межвуз.сб.н.тр-в:Обработка сложных сигналов на базе устройств функциональной электроники и цифровой техники / Рязанск. радиотехн. ин-т, 1985.-С.33-37.

19. Стахов А.П., Азаров А.Д. Перспективы создания высокопроизводительных АПП и ЦАП на основе избыточных измерительных кодов// V Всесоюзн.симпозиум: Проблемы создания преобразователей формы информации: Тез. докл.-К.,1984.-С.54-56.

20. Стахов А.П., Азаров А.Д., Мойсеев В.И. Избыточные измерительные коды и их использование для построения АПП и ЦАП // Всесоюзн.конф.ИИС-81: Тез.докл.-Львов,1982.-С.88-93.

21. Азаров А.Д., Мойсеев В.И., Марценюк В.П. Методы контроля преобразователей формы информации на основе избыточных измерительных кодов // Межвуз.сб.н.тр-в: Автоматизация обработки первичных данных / Пенз. политехн. ин-т., 1984.-С.107-108.

22. Азаров А.Д., Марценюк В.П., Стейскал В.Я. и др.

Применение оптоэлектронных элементов в АЦП на основе изом- точных кодов Фибоначчи // Матер. II Всесоюзн. н-техн. конф. по функциональной оптоэлектронике. / Вилница - Тбилиси, 1987.-С.382-386.

23. Марценк В.П., Азаров А.Д., Моисеев В.И. Анализ схем сравнения токов на основе преобразователя "ток-напряже- ние". // Гибридные вычислительные машины и комплексы, вып.6., 1983.-С.69-75.

24. Стахов А.П., Азаров А.Д., Марценк В.П. и др. Па- раметры и схемотехника высокопроизводительных АЦП и ЦАП //Зарубежная радиоэлектроника, №2, 1984.-С.79-90.

25. Азаров А.Д., Моисеев В.И., Стейскал В.Я. Высоко- точный АЦП с повышенной эффективностью функционирования // Методы и микроселектронные средства преобразования и обра- ботки сигналов. Ч. I. Ин-т электроники и выч. техники. Рига, 1983.-С.49-52.

26. Стахов А.П., Марценк В.П., Азаров А.Д. Высокоото- чный АЦП, сопряженный с микроЭВМ // Управляющие системы и машины, №5, 1985.-С.23-27.

27. Стахов А.П., Азаров А.Д., Моисеев В.И. и др. Сем- надцатирядный самокорректирующийся АЦП // Приборы и сис- темы управления №1, 1985.-С.17-18.

28. Марценк В.П., Азаров А.Д. Анализ температурных погрешностей ПКТ // Математические методы и измерительно-вы- числительные средства обработки изображений.: Сабчота Сакарт- вело, Тбилиси, 1987.-С.267-272.

29. Патент Франции N2500971, МКИ Н 03 К. Аналого-цифро- вой преобразователь / А.П.Стахов, А.Д.Азаров, В.А.Луцкий (СССР).- 16с.:ил.

30. Патент Англии N2091507, МКИ Н 03 К. Аналого-цифровой преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. А. Лужецкий (СССР). - 18с.:ил.

31. Патент Франции N2428031, МКИ Н 03 К. Преобразователь р-кодов в аналоговую величину / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев и др. (СССР). - 16с.:ил.

32. Патент Канады N1658889, МКИ Н 03 К. Преобразователь р-кодов в аналоговую величину / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев и др. (СССР). - 16с.:ил.

33. Патент Англии N2090490, МКИ Н 03 К. Преобразователь р-кодов в аналоговую величину / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев и др. (СССР). - 16с.:ил.

34. Способ аналого-цифрового преобразования: А. с. 1304172 СССР Н 03 М 1/26 / А. П. Стахов, А. Д. Азаров., В. Я. Стейскал и др. (СССР). - 3с.:ил.

35. Аналого-цифровой преобразователь: А. с. 1223368 СССР Н 03 М 1/26 / А. П. Стахов, А. Д. Азаров., В. Я. Стейскал и др. (СССР). - 8с.:ил.

36. Аналого-цифровой преобразователь: А. с. 1226664 СССР Н 03 М 1/26 / А. П. Стахов, А. Д. Азаров., В. Я. Стейскал и др. (СССР). - 8с.:ил.

37. Устройство аналого-цифрового преобразования А. с. 1288914 СССР Н 03 М 1/26 / А. П. Стахов, А. Д. Азаров., В. И. Моисеев и др. (СССР). - 12с.:ил.

38. Входное устройство схемы сравнения токов: А. с. 1450098 СССР Н 03 К 5/24, G 05 / А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, Ю. М. Степайко и др. (СССР). - 4с.:ил.

39. Двухтактный усилитель мощности: А. с. 1491713 СССР Н 03 F 3/26 / А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, В. П. Мерценник

и др. (СССР). - 3с.: ил.

40. Устройство для аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования: А.с. 1474824 СССР Н 03 М 1/02/А.Д.Азаров., В.П.Мерценжк, В.И.Моисеев и др. (СССР).-14с.:ил.

41. Аналого-цифровой преобразователь: А.с. 1495993 СССР Н 03 М 1/26/ А.П.Стахов, А.Д.Азаров, В.И.Моисеев и др. (СССР).-7с.:ил.

42. Преобразователь код-ток: А.с. 1499498 СССР Н 03 М 1/26/ А.Д.Азаров, В.Я.Стейскал, Ю. М. Степайко и др. (СССР). - 4с.: ил.

43. Аналого-цифровой преобразователь: А. с. 1513619 СССР Н 03 М 1/2Б / А.П.Стахов, А.Д.Азаров, В.И.Моисеев и др. (СССР) .-7с. :ил.

44. Входное устройство схемы сравнения токов: А. с. 1529434 СССР Н 03 К 5/24 / А.Д.Азаров , В.Я.Стейскал, Ю. М. Степайко и др. (СССР). - 5с.: ил.

45. Стабилизатор постоянного тока: А.с. 1534440 СССР G 05 P 1/56/А.Д. Азаров, В.Я.Стейскал, В.П.Волков (СССР).-3с.:ил.

46. Усилитель тока: А.с. 1548841 СССР Н 03 P 3/26 / А.Д. Азаров, В.Я. Стейскал, Ю.М. Степайко (СССР).-3с.:ил.

47. Аналоговое запоминающее устройство : А.с. 1552231 СССР G 11 С 27/00 /А. Д. Азаров, В.Я.Стейскал, А.П. Голубев и др. (СССР). - 4с.: ил.

48. Усилитель тока: А. с. 1739476 СССР Н 03 P 3/26 /А. Д. Азаров, В.Я.Стейскал, Е.М. Арапова и др. (СССР). - 3с.: ил.

Azarov A.D. The design of analog-to-digital conversion theory on the basis of redundant position number system. Thesis submitted to earn the degree of Doctor of Engineering Science in speciality 05.11.16 - information measuring systems (in science and industry), Vinnitsa State Technical University, Vinnitsa 1994 year. Submitted for the defence are 35 scientific works, 5 abroad claimed patents and 63 author's invention certificates that contains researches in introduction of information redundancy in ADS and DAS systems. The suggested approach is supposed to make possible a complex solution of increasing accuracy and speed of ADC conversion of high resolution problem. The working out has applied industry.

Азаров А. Д. Разработка теории аналого-цифрового преобразования на основе избыточных позиционных систем счисления. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.16 - информационно-измерительные системы (в науке и промышленности), Винницкий государственных технический университет, Винница, 1994 г. Защищается 35 научных работ, 5 зарубежных патентов и 63 авторских свидетельства на изобретение, которые содержат исследования по введению информационной избыточности в системные АЦП и ЦАП. Установлено, что предлагаемый подход позволяет в комплексе решать проблемы повышения точности и скорости аналого-цифрового преобразования высокого разрешения. Освоено промышленное внедрение выполненных разработок.

Ключові слова: аналого-цифрові перетворювачі, надлишкові позиційні системи числення.

*Azarov*

Д Л Я      З А М Е Т О К

Полное и краткое  
№ 100  
Краткое описание  
№ 100  
"Мир" из серии "Мир"





AB 31.565