

На правах рукопису

КРУПЕЛЬНИЦЬКИЙ Леонід Віталійович



**АНАЛОГОВІ ПРИСТРОЇ САМОКОРИГУЮЧИХ АЦП
ДЛЯ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКИ
НИЗЬКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ**

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

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

ЛВ 29063



00753686 (Z)

Робота виконана в Спеціальному конструкторсько-технологічному бюро "Модуль" Вінницького політехнічного інституту.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Азаров Олексій Дмитрович.

Офіційні опоненти:

1. Доктор технічних наук, професор Кондалев Андрій Іванович.
2. Кандидат технічних наук, доцент Бухалов Володимир Валентинович.

Провідна організація: Державний науково-дослідний інститут
" Система " (м. Львів).

Захист відбудеться 26 лютого 1994 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 10.01.01 в Вінницькому політехнічному інституті (286 021, м.Вінниця, Хмельницьке шосе, 95).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького політехнічного інституту.

Автореферат розісланий 21 січня 1994 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Вхиччук С.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми.

Вирок застосування інформаційно-вимірвальної техніки нерозривно пов'язано з проблемами сполучення сигналів, що отримуються від аналогових датчиків, з засобами цифрової обробки інформації. Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) є невід'ємними компонентами ряду сучасних інформаційно-вимірвальних систем (ІВС) і багато в чому визначають їх ефективність. Підвищені вимоги до точності та швидкодії АЦП в першу чергу виникають при створенні автоматизованих технологічних установок, вимірвальних пристроїв, систем запису, відтворення та обробки звукових, гідроакустичних, сейсмічних сигналів. При розробці АЦП для визначених систем вимірвання та обробки низькочастотних сигналів виникає необхідність розгляду перетворювачів аналог-код як сукупності аналогових та цифрових пристроїв (нормуючих підсилювачів, фільтрів, комутаторів, підсилювачів вибірки-зберігання, джерел опорних величин, схем порівняння, керуючих та інтерфейсних пристроїв і т.п.). Такий підхід дозволяє виділити статичні та динамічні складові загальної похибки та оптимізувати характеристики всього тракту проходження вимірвального сигналу - від датчика до засобу обробки.

Застосування комплексного підходу особливо актуально при розробці аналогових пристроїв для високоточних АЦП і ІВС (з точністю аналого-цифрового перетворення на рівні 14-ти і більше двійкових розрядів). Найбільш ефективним шляхом створення високоточних перетворювачів, як свідчить світовий та вітчизняний досвід, є застосування структурних методів самокалібровки та самокорекції. Представниками таких АЦП є розглянуті в дисертації самокоригувчі АЦП на основі надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ) з використанням чисел Фібоначчі та "золотої прапорці".

Відомо, що в самокоригуючих АЦП можлива цифрова корекція похибок аналогових пристроїв. Але системного підходу щодо аналізу і синтезу таких пристроїв розроблено не було. Крім того, в процесі практичної реалізації самокоригуючих АЦП було виявлено ряд проблем, що потребують окремих досліджень стосовно метрологічних характеристик, структурних та схемотехнічних рішень, методів корекції. Причому, рамки цих досліджень не обмежуються самокоригуючими АЦП, а можуть бути поширені на високоточні АЦП та ІВС в цілому.

Мета роботи та задачі досліджень:

розробити критерії ефективності проектування аналогових пристроїв та встановити їх взаємозв'язок з метрологічними характеристиками АЦП та ІВС;

скласти математичні моделі аналогових пристроїв, визначити похибки, що коригуються, і похибки, які не можуть бути скориговані;

запропонувати структурні та схемотехнічні рішення аналогових пристроїв, оптимізувати їх параметри шляхом експериментальних досліджень та моделювання на ЕОМ;

реалізувати і дослідити самокоригуючі АЦП та системи вимірювання та обробки сигналів з застосуванням розроблених аналогових пристроїв.

Основні положення, що виносяться на захист.

1. Використання методів самокорекції при проектуванні аналогових пристроїв АЦП підвищує ефективність функціонування систем вимірювання та обробки низькочастотних сигналів.

2. Розроблений комплекс нормованих метрологічних характеристик високоточних АЦП адекватно характеризує їх точність та швидкість в складі ІВС.

3. Розроблені моделі похибок аналогових пристроїв самокоригуючих АЦП є основою для аналізу складових коригованих та некоригованих похибок, а також шляхів їх зменшення.

4. Принципи побудови аналогових пристроїв самокоригуючих АЦП для розробки структурних та схемотехнічних рішень вхідного пристрою, пристрою квантування і пристрою дискретизації.

5. Структурні та алгоритмічні рішення самокоригуючих АЦП і ІВС з використанням розроблених аналогових пристроїв.

Методи досліджень.

В роботі використано методи теорії похибок, методи спектрального аналізу, чисельні методи, методи машинного аналізу і моделювання електронних схем.

Наукова новизна.

1. Запропоновано при проектуванні ІВС, самокоригуючих АЦП та їх аналогових пристроїв використовувати методику аналізу, яка передбачає використання спільних критеріїв ефективності і спільний підхід, який базується на корекції похибок.

2. Розроблено комплекс нормованих метрологічних характеристик високоточних самокоригуючих АЦП і їх аналогових пристроїв. Визначені кориговані і некориговані похибки, а також встановлено взаємозв'язки між ними.

3. Запропоновано інтегральні оцінки похибок вхідного пристрою АЦП, які враховують спектральні характеристики вхідного сигналу.

4. Запропонована методика вимірювань та виведена аналітична залежність, яка дозволяє оцінити час апертурної невизначеності дискретизатора по спектру вихідного сигналу АЦП.

5. Складена математична модель перехідних процесів в пристрої квантування, яка дозволяє більш точно оцінювати динамічні похибки аналого-цифрового перетворення;

6. Розроблено методи корекції нелінійності статичної передаточної характеристики та нерівномірності амплітудно- і фазо-частотної характеристик вхідного пристрою.

Практична цінність.

1. На основі аналізу математичних моделей похибок запропоновано евристичні методи структурного і схемотехнічного синтезу аналогових пристроїв.

2. Розроблено і досліджено аналогові пристрої високоточних самокоригуючих АЦП: вхідний пристрій, пристрій дискретизації і пристрій квантування. Основні вузли пристроїв реалізовано у вигляді гібридних інтегральних схем.

3. Розроблено дослідні зразки самокоригуючих АЦП і високоточних вимірвальних систем.

Реалізація результатів.

На основі теоретичних і експериментальних досліджень аналогових пристроїв реалізовані ряд виробів, у тому числі:

вимірвальний 18-розрядний самокоригуючий АЦП для автоматизації технологічних процесів;

швидкодійний 16-розрядний самокоригуючий АЦП для вимірювання та обробки сигналів;

вимірвальна система атестації тензоелементів;

аналізатор параметрів звукових трактів.

Вказані розробки використовуються організаціями України та Росії, у тому числі Укртелерадіокомпанією, АТ "Манометр" (м. Москва).

Апробація роботи.

Основні положення дисертаційної роботи були представлені автором і обговорювались на: 6-му Всесоюзному симпозиумі "Проблеми створення перетворювачів форми Інформації" (м. Київ, 1988 р.); 2-й Всесоюзній науково-технічній конференції "Технологія ГІС і питання їх виробництва" (м. Ярославль, 1988 р.); науково-технічній конференції "Методи і мікроелектронні засоби цифрового перетворення і обробки сигналів" (м. Рига, 1989 р.); 2-й Всесоюзній конференції "Проблеми та перспективи розвитку цифрової звукової техні-

ки" (м. Ленінград, 1990 р.); Республіканській конференції "Питання проектування та практичного використання ПФІ в керуваних та обчислювальних комплексах" (м. Одеса, 1990 р.); науково-технічній конференції країни СНД "Контроль та керування в технічних системах" (м. Вінниця, 1992 р.); 7-му симпозиумі "Проблеми створення перетворювачів форми інформації" (м. Київ, 1992 р.).

Публікації.

Результати виконаних досліджень опубліковано в 28 роботах, в числі яких 7 авторських свідоцтв на винаходи і 2 позитивних рішення по заявках на винаходи.

Структура та обсяг дисертації.

Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновку, списку літератури та додатків. Робота має 150 сторінок машинописного тексту, 45 сторінок рисунків і таблиць, список літератури із 111 найменувань на 11 сторінках та додатки на 53 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У ВСТУПІ показана актуальність дослідження, визначені основні цілі та задачі, що вирішуються в дисертаційній роботі.

В ПЕРШОМУ РОЗДІЛІ виконано аналіз тенденцій розвитку техніки високочастотних АЦП та встановлено системні вимоги до них. До систем вимірювання та обробки низькочастотних сигналів, що розглядаються в контексті виконаних досліджень, застосовано таку класифікацію:

- автоматизовані технологічні контрольно-вимірвальні установки;
- інформаційно-вимірвальні системи збору, запису та обробки сигналів;

системи та прилади для вимірювання параметрів низькочастотних сигналів та трактів.

Загальною рисою вказаних вимірвальних систем є необхідність високоточного аналого-цифрового перетворення сигналів постійного струму та сигналів низьких частот. Системні параметри можуть бути забезпечені при застосуванні АЦП з точністю, яка відповідає 14-ти - 20-ти розрядам двійкового коду і швидкодією, яка необхідна для перетворення сигналів зі спектром від 0 до 20 кГц. Для вказаних ІВС необхідним є також наявність у складі АЦП аналогових пристроїв, що забезпечують узгодження з датчиками вимірвальних сигналів. Функціональні можливості АЦП повинні передбачати самоконтроль та попередню обробку інформації.

Огляд технічних характеристик і методів побудови сучасних високоточних АЦП свідчить про широке використання в них різноманітних способів корекції та автокалібровки. В дельта-сигма перетворювачах здійснюється накопичення та обробка відліків вхідного сигналу з метою зменшення шумів, що вносяться аналоговими елементами. В паралельно-последовних АЦП коригуються похибки узгодження між аналоговими пристроями, які беруть участь в різних етапах перетворення. В АЦП порозрядного наближення коригуються похибки, що вносяться за рахунок неідеальності ваги розрядів. У всіх випадках підвищення точності та швидкодії АЦП пов'язано з введенням надлишковості в структурні, алгоритмічні, схемотехнічні, технологічні або конструктивні рішення.

В результаті аналізу переваг та недоліків розглянутих структурних схем АЦП і особливостей їх аналогових пристроїв встановлено, що по ряду критеріїв в системах вимірювання та обробки сигналів доцільно застосовувати АЦП порозрядного наближення. При цьому використання НПСЧ в самокоригуючих АЦП цього типу забезпечує такі переваги:

можлива корекція похибок ваги розрядів великих значень (до 23,6% для ЦАП на основі "золотої пропорції"), а це дозволяє виготовляти резистивні матриці засобами поширеної технології і без підстройки. Цей фактор дозволяє також за рахунок самокорекції

забезпечити високоточне функціонування АЦП в широкому температурному діапазоні і на протязі тривалого часу;

можлива автокомпенсація динамічних похибок першого і другого виду, що дозволяє істотно (в 6-9 разів для 14-18 -розрядних перетворювачів) збільшити швидкість надлишкового АЦП в порівнянні з двійковим АЦП тієї ж розрядності;

наявність в самокоригуючих АЦП встроеного обчислювально-керуючого блоку дозволяє додатково реалізувати алгоритми корекції систематичних похибок аналогових пристроїв, а також здійснити в АЦП попередню обробку інформації.

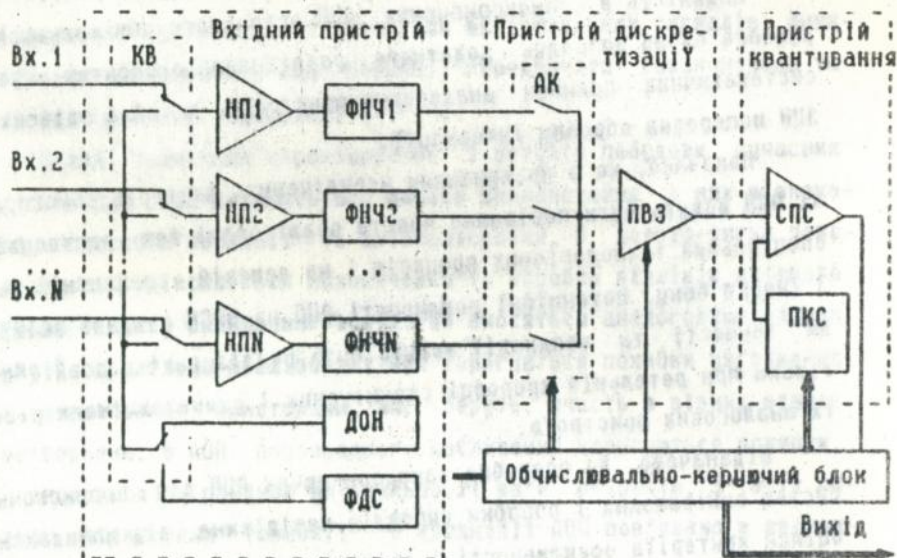
Показано, що з урахуванням перелічених факторів самокоригуючі АЦП можуть бути порівняно просто реалізовані без застосування спеціальних технологічних процесів і на дешевій елементній базі. З іншого боку, потенційні можливості АЦП на НПСЧ в плані збільшення точності та швидкодії можуть бути реалізовані в повній мірі тільки при ретельній проробці структурних і схемотехнічних рішень їх аналогових пристроїв.

Відзначено, що розробка самокоригуючих АЦП для високоточних систем вимірювання і обробки сигналів невід'ємна від комплексної оцінки критеріїв ефективності і аналізу метрологічних характеристик. Вказано, що по відношенню до вказаних АЦП і систем найбільшу увагу необхідно приділити аналізу динамічних характеристик, як таких, що не знайшли свого достатнього відображення в діючих стандартах та в наукових публікаціях.

За підсумками виконаного огляду і аналізу літератури в першому розділі визначені напрямки досліджень і намічені підходи до вирішення основних задач дисертаційної роботи. Показано, що розв'язання висунутих задач актуально не тільки для розвитку техніки самокоригуючих АЦП, але і для вироблення критеріїв оцінювання ефективності, для нормування метрологічних характеристик, для розробки вітчизняних та для застосування зарубіжних високоточних АЦП в системах вимірювання та обробки низькочастотних сигналів.

В ДРУГОМУ РОЗДІЛІ проведено системний аналіз взаємозв'язків параметрів аналогових пристроїв з метрологічними характеристиками самокоригуючих АЦП системного застосування. Викладено теоретичні положення для синтезу структур, схемотехніки та алгоритмів корекції аналогових пристроїв САЦА.

Структурна схема самокоригуючого АЦП для систем вимірювання та обробки низькочастотних сигналів



Розглянута узагальнена структурна схема самокоригуючого АЦП і запропонований показаний на рисунку поділ аналогових пристроїв на вхідний пристрій, пристрій дискретизації і пристрій квантування. До вхідного пристрою віднесено нормуючі підсилювачі (НП), фільтри низької частоти (ФНЧ) і вузли, які необхідні для самокорекції АЦП: комутатор входів (КВ), джерело опорної напруги (ДОН), формувач допоміжних сигналів (ФДС). Пристрій дискретизації містить аналоговий комутатор (АК) та підсилювач вибірки-зберігання (ПВЗ). Пристрій квантування розглядається як сукупність перетворювача код-струм (ПКС) та схеми порівняння струмів (СПС). Керування рішеннями самокорекції АЦП та безпосереднього перетворення здійснюється обчислювально-керувачим блоком.

Розглянуто існуючі підходи щодо оцінювання ефективності АЦП у складі ІВС. Запропоновано використовувати на стадії розробки цільову функцію ефективності, в котрій як окремі критерії виступають складові комплексу нормованих метрологічних характеристик АЦП, а як обмеження - показники вартості та надійності.

Показано, що на даний час не розроблено єдиного комплексу нормованих метрологічних характеристик високоточних АЦП, особливо в частині динамічних складових. Для створення такого комплексу і для встановлення взаємозв'язку між метрологічними характеристиками ІВС, самокоригуваних АЦП та їх аналогових пристроїв проведено аналіз математичних моделей похибок вхідного пристрою, пристрою дискретизації і пристрою квантування. При цьому, поруч з аналізом статичних і динамічних характеристик та можливостей їх корекції, запропоновано ввести ряд моделей похибок, котрі дозволяють комплексно описувати функціонування АЦП і аналогових пристроїв в складі вимірвальних систем.

Аналіз моделі вхідного пристрою показав можливість корекції адитивної та мультиплікативної похибок статичної передаточної характеристики (СПХ), а при організації відповідного алгоритму - і нелінійності СПХ.

Для інтегральної оцінки амплітудно- і фази-частотних характеристик (АЧХ і ФЧХ) вхідного пристрою запропоновано використовувати вагову функцію, значення якої пропорційні усередненим значенням модуля щільності спектру вхідного сигналу $E(\omega) = |E(j\omega)|$. Інтегральну нерівномірність АЧХ при цьому можна зобразити у вигляді:

$$\Delta_{\text{АЧХ}}^i = \frac{1}{(\omega_0 - \omega_n) \cdot E(\omega_0)} \int_{\omega_n}^{\omega_0} E(\omega) \cdot \left| 1 - \frac{A(\omega)}{A(\omega_0)} \right| d\omega, \quad (1)$$

де ω_n і ω_0 - відповідно верхня і нижня границі вхідного діапазону частот; ω_0 - опорна частота; $A(\omega)$ - функція АЧХ.

Для оцінювання властивостей ФЧХ запропоновано використовувати

значення інтегральної нелінійності:

$$\Delta_{\text{ФЧХ}}^{\epsilon} = \frac{1}{(\omega_n - \omega_{n-1}) E(\omega_n)} \int_{\omega_n}^{\omega_{n+1}} E(\omega) |\varphi(\omega) - \varphi_n(\omega)| d\omega, \quad (2)$$

де $\varphi(\omega)$ - функція ФЧХ; $\varphi_n(\omega)$ - лінійна частина $\varphi(\omega)$.

Якість ФНЧ у смузі подавлення запропоновано характеризувати коефіцієнтом антинакладання спектрів:

$$\Delta_a = \frac{\int_{\omega_g/2}^{\omega_g} E(\omega) \cdot A(\omega) d\omega}{\int_{\omega_g/2}^{\omega_g} E(\omega) \cdot A(\omega) d\omega}, \quad (3)$$

де ω_g - частота дискретизації АЦП.

Для оцінювання нелінійних спотворень і шумів вхідного пристрою і дискретизатора обрано метод аналізу спектру вихідного сигналу АЦП. При цьому вхідний сигнал формується у вигляді гармонійної напруги $U_{\text{вх}}(t) = U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$, а вихідна цифрова послідовність підлягає зворотному перетворенню Фур'є. Доведено, що при такому підході можливо також визначення однієї з найважливіших динамічних характеристик ПВЗ - середньоквадратичного значення часу апертурної невизначеності:

$$\hat{\tau}_a = \frac{T}{U_0 \cdot \omega} \sqrt{e_{\text{вх}}^2 - e_{\text{нч}}^2} \quad (4)$$

де $e_{\text{вх}}$ і $e_{\text{нч}}$ - напруги шумів на виході АЦП, одержані при вимірюваннях на високих $\omega_{\text{вх}}$ і низьких $\omega_{\text{нч}}$ частотах відповідно. При виведенні формули (4) показано, що вплив $\hat{\tau}_a$ на низькочастотному вхідному сигналі незначний, а вплив початкової фази можна вилучити за рахунок усереднення результатів вимірювання. Отже, зростання шумів на високій частоті $\omega_{\text{вх}}$ обумовлюється проявом $\hat{\tau}_a$, що і використовується в запропонованій методиці вимірювань.

Для аналогового комутатора і ПВЗ розглянута також модель перехідного процесу, яка складається з лінійної і експоненційної ділянок. З метою розрахунку похибки усталення вихідного сигналу

розроблена програма в середовищі математичного пакету MathCAD.

Проведено аналіз статичних і динамічних похибок пристроїв квантування САЦП. Відзначено, що параметри інтегральної і диференційної нелінійності практично стали загальноприйнятими. В той же час для аналізу динамічних похибок квантувача, як правило, користуються експоненційною моделлю, яка неадекватно відображає перехідні процеси під час аналого-цифрового перетворення. Запропоновано модель перехідного процесу, в якій для кожного із тактів перетворення враховано: час затримки ввімкнення t_{M1} і вимкнення t_{M2} розряду ПКС, перехідну комутаційну перешкоду амплітудою A_n і постійною часу τ_n , двоетапний процес усталення компенсуючого сигналу в СПС з амплітудою A_1 і A_2 , постійними часу τ_1 і τ_2 ($A_1 > A_2$, $\tau_1 < \tau_2$). При цьому процес ввімкнення розряду ПКС у вигляді напруги на виході підсилювача струму СПС можна записати як:

$$U_x^{on}(t) = A_n e^{-\frac{t}{\tau_n}} + a_{пер}(t - t_{M1}) [A_1 (1 - e^{-\frac{t-t_{M1}}{\tau_1}}) + A_2 (1 - e^{-\frac{t-t_{M1}}{\tau_2}})], \quad (5)$$

де $a_{пер}(t) = \{0, 1\}$ - функція перемикання розряду ПКС.

При вимкненні розряду:

$$U_x^{off}(t) = -A_n e^{-\frac{t}{\tau_n}} + a_{пер}(t - t_{M1}) [A_1 e^{-\frac{t-t_{M1}}{\tau_1}} + A_2 e^{-\frac{t-t_{M1}}{\tau_2}}]. \quad (6)$$

Наведена модель перехідних процесів досліджена засобами пакету MathCAD.

В результаті проведеного аналізу математичних моделей аналогових пристроїв виконано систематизацію і формування комплексу нормованих метрологічних характеристик. До статичних складових комплексу віднесено такі параметри та похибки: розрядність вихідного двійкового коду; систематичне значення абсолютної похибки СПХ; роздільна здатність; інтегральна нелінійність СПХ; диференціальна нелінійність СПХ; адитивна похибка СПХ; мульти-

плікативна похибка СПХ; напруга шумів, що приведена до входу; вхідні опір, ємність, струм витікання.

Динамічні характеристики САЦП запропоновано визначати з урахуванням таких складових: час перетворення; інтегральна нерівномірність АЧХ; інтегральна нелінійність ФЧХ; похибка від антинакладання спектрів; коефіцієнт нелінійних спотворень; коефіцієнт різницевого тону; відношення сигналу до шуму дискретизації та квантування; систематичне значення апертурної похибки; середньоквадратичне значення часу апертурної невизначеності; похибка від недоусталення при перемиканні вхідних каналів; похибка від взаємодопливу між каналами.

ТРЕТІЙ РОЗДІЛ присвячено розробці та дослідженню структурних та схемотехнічних рішень аналогових пристроїв САЦП для систем вимірювання та обробки низькочастотних сигналів: вхідного пристрою, пристрою дискретизації та пристрою квантування.

При розробці вхідного пристрою досліджено нормувачі підсилювачі, фільтри НЧ і джерела опорної напруги (ДОН). Показано, що для високоточного вимірювання вихідних напруг датчиків фізичних величин необхідне внесення підсилювачів в контур цифрової корекції. Для вимірвальних підсилювачів виділено похибки, які коригуються і такі, що не коригуються. Запропоновано схемотехнічні рішення програмованих підсилювачів та вхідних кіл, в яких мінімізовано похибки, що не коригуються. Експериментальні дослідження програмованих підсилювачів показали можливість одержання після самокорекції значення приведеної похибки не більше 0.02 % при вхідному діапазоні напруг 100 мВ.

Для підсилювачів з гладкою нелінійністю СПХ запропоновано метод поточної корекції нелінійності, котрий не потребує застосування додаткових прецизійних елементів. Корекція здійснюється за допомогою процесора, що входить до складу САЦП. При оцінюванні

ефективності метода показано, що для зниження нелінійності, наприклад, з 0.1 % до 0.001 % необхідне застосування трирешетчатого коригуючого ЦАП, замість 12-розрядного, як в прототипі.

Розглянута задача вибору активних ФНЧ для вхідних пристроїв САЦП. Проаналізовані особливості фільтрів Баттєрворта, Чебишева і Бесселя. Рекомендовано застосування фільтрів Баттєрворта, які характеризуються компромісним набором параметрів. Наведено приклад розробки ФНЧ з використанням програми схемотехнічного аналізу.

Запропоновані схемотехнічні рішення високоточних термостатованих ДОН, приведено розрахункові і експериментальні дані, що підтверджують їх ефективність. Так, температурний коефіцієнт стабілізації напруги термостатованого ДОН з кільцевим відбивачем струму складає $0.3 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Пристрій дискретизації САЦП розглянуто як такий, що складається із ПВЗ та аналогового комутатору. За основу для побудови ПВЗ обрано структуру інтеграторного типу з мостовим діодним ключем (МДК). Побудована математична модель, що описує залежність нелінійних спотворень і часу вибірки від початкового струму МДК. Одержано числові результати, які підтверджено схемотехнічними моделюваннями ПВЗ на ПЕОМ. Так, наприклад, показано, що для забезпечення нелінійних спотворень ПВЗ на рівні 0.0015 % при ємності конденсатора зберігання 500 пФ і частоті вхідного сигналу 20 кГц, початковий струм МДК повинен бути не меншим 1.7 мА. При цьому час вибірки з похибкою 0.001 % складає близько 4.0 мкс.

Для збільшення швидкості ПВЗ запропоновано структури з залежним від часу струмом МДК і з попереднім підсилювачем струму. В названих структурах струм досягає свого максимального значення в початковий момент вибірки і експоненційно спадає до моменту її закінчення, що зменшує споживану потужність (у розглянутому прикладі в 16.8 раз). Проаналізовані динамічні похибки і розроблена схема попереднього струмового підсилювача ПВЗ. Час вибірки ПВЗ з

похибкою 0.001% вдалось зменшити до 2.0 мкс.

Розглянуті еквівалентні схеми аналогових комутаторів і запропоновано рішення для зменшення похибки від прямого проходження сигналу (в прикладі - від мінус 56 дБ до мінус 96 дБ, тобто в 100 раз).

Структурні та схемотехнічні особливості пристрою квантування САЦП розглянуто стосовно перетворювача код-стум ПКС та схеми порівняння струмів СПС. Визначені вимоги щодо точності, температурної і часової стабільності вузлів пристрою квантування, вказано на шляхи їх забезпечення за рахунок схемотехнічних рішень. Температурний коефіцієнт вихідного струму ПКС складає не більше $100 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, температурний дрейф вхідного струму СПС - $10 \text{ нА/}^\circ\text{C}$. Одержані значення статичних параметрів дозволяють реалізувати засобами дискретної та гібридної технології 16-20-розрядні САЦП для роботи в діапазоні температур від мінус 30°C до $+70^\circ\text{C}$.

Проаналізована похибка суперпозиції ПКС і в процесі моделювання резистивної матриці доведено, що зазначена похибка не може бути скоригована і повинна бути зменшена схемотехнічно.

Досліджено перехідні процеси в діодних струмових ключах та одержано експериментальні залежності між значенням струму розряду, ємністю елементів, амплітудою керуючого сигналу і затримкою моментів ввімкнення та вимкнення струму. В розробленому ПКС при мінімальному струмі розряду 300 мкА час усталення струму з похибкою 10 % складає 150 нс.

З метою збільшення швидкодії СПС запропонована й експериментально досліджена структура струмового підсилювача з двоступінчастим від'ємним зворотнім зв'язком. Постійна часу перехідного процесу склала 100 нс, що в 2-3 рази менше, ніж при простому зворотньому зв'язку. Одержана швидкодія ПКС і СПС дозволяє в 16-розрядному САЦП при використанні адаптивного способу послідовного наближення з автокомпенсацією динамічних похибок скоротити час одного

такту до 300 нс, а загальний час перетворення до 7 мкс.

Основні вузли досліджених аналогових пристроїв виконані у вигляді гібридних інтегральних схем, які підтвердили свою ефективність при роботі у складі САЦП для високоточних інформаційно-вимірвальних систем.

У ЧЕТВЕРТОМУ РОЗДІЛІ розглянуто приклади практичної реалізації САЦП, вимірвальних систем та комплексів з використанням розроблених в дисертації аналогових пристроїв. Показано, що найбільш ефективно САЦП в складі систем вимірювання та обробки низькочастотних сигналів розв'язують задачі високоточного перетворення абсолютних значень постійного струму та високолінійного перетворення сигналів низьких (звукових) частот.

Перший напрямок представлений мікропроцесорним 18-розрядним вимірвальним перетворювачем САЦП-МКЗ і системою атестації тензоелементів (САТ). Другий - високолінійним швидкодіючим 16-розрядним САЦП-021 і аналізатором параметрів звукових трактів (АПЗТ). Для вказаних виробів розглянута специфіка відповідної розробки, наведено структурні схеми, описано особливості аналогових пристроїв, алгоритмів корекції похибок.

Основні технічні параметри САЦП-МКЗ: діапазон вхідних напруг ± 10 В; розрядність вихідного двійкового коду - 18; час перетворення - 500 мкс; абсолютна похибка - не більше $(400 + (U_{вх} [В] / 10) * 500)$ мкВ; інтегральна і диференціальна нелінійності - не більше 0,002 %; робочий діапазон температур - від мінус 10 °С до + 55 °С; маса - не більше 1,5 кг.

Основні технічні параметри САЦП-021: діапазон вхідних напруг ± 5 В; розрядність вихідного двійкового коду - 16; час перетворення - 10 мкс; діапазон частот вхідного сигналу - від 0 Гц до 25 кГц; коефіцієнт нелінійних спотворень - не більше 0,01 %; відношення сигнал/шум - не менше 86 дБ; маса - не більше 2,0 кг.

На прикладі САТ продемонстрована можливість введення в контур корекції статичних похибок не тільки електронної, але й механічної частин вимірвальної системи. САТ впроваджено як складову частину контрольно-вимірвальної системи атестації тензоімодулів при виробництві датчиків тиску на АТ "Манометр" (м. Москва).

В АПЗТ реалізовано корекцію як статичних, так і ряду динамічних характеристик аналогових пристроїв. Запропоновано алгоритми корекції АЧХ і ФЧХ фільтрів НЧ. Алгоритми обробки сигналів, що використовуються в АПЗТ, ґрунтуються на результатах досліджень комплексу нормованих метрологічних характеристик та методів їх вимірювання. АПЗТ пройшов метрологічну атестацію в ДНДІ "Система" (м. Львів) і впроваджений в Укртелерадіокомпанію як автоматизований засіб вимірювання параметрів мішмських трактів звукового мовлення.

Основні результати та висновки

1. Запропоновано при проектуванні ІВС, самокоригуючих АЦП та їх аналогових пристроїв використовувати методику аналізу, в якій критеріями для оцінювання ефективності є складові комплексу нормованих метрологічних характеристик. За допомогою експериментальних досліджень розроблено математичні моделі аналогових пристроїв АЦП і ІВС. На основі цих моделей визначено статичні та динамічні складові комплексу, досліджено кориговані та некориговані похибки та встановлено їх взаємозв'язок.
2. Запропоновано інтегральні оцінки нерівномірності АЧХ, нелінійності ФЧХ, похибки антинакладання спектрів у вхідному пристрої, в яких врахововано спектральні характеристики вхідного сигналу.
3. Розроблена методика вимірювань та отримана аналітична залежність середньоквадратичного значення часу апертурної невизначеності пристрою дискретизації від спектру вихідного сигналу АЦП.
4. Запропонована математична модель перехідних процесів в пристрої квантування, що враховує затримки ввімкнення розрядів

ПКС, перехідні перешкоди і двоетапний характер усталення сигналу на виході СПС.

5. Розроблені та досліджені структурні і схемотехнічні рішення аналогових пристроїв САЦП та їх вузлів: вимірвального підсилювача, активного фільтра НЧ, термостатованого джерела опорної напруги, прецизійного аналогового комутатора, підсилювача вибірки-зберігання, перетворювача код-струм, схеми порівняння струмів.

6. Запропоновано та досліджено метод корекції похибки лінійності СПХ вимірвального підсилювача і метод корекції нерівномірності АЧХ і нелінійності ФЧХ фільтрів НЧ.

7. На основі досліджень аналогових пристроїв та методів їх корекції розроблені дослідні зразки ряду виробів, в числі яких: вимірвальний 18-розрядний аналого-цифровий самокоригуючий перетворювач САЦП-МКЗ; швидкодійний 16-розрядний аналого-цифровий самокоригуючий перетворювач САЦП-021; вимірвальна система атестації тензоелементів САТ; аналізатор параметрів звукових трактів АПЗТ. Вказані вироби виробляються в СКТБ "Модуль" ВПІ і запроваджені в ряді організацій України та СНД.

Основний зміст роботи викладено в публікаціях:

1. Крупельницький Л.В. Аналоговые устройства самокорректирующихся АЦП // Вопросы проектирования и практического использования ПФИ в управляющих и вычислительных комплексах. Тез. докл. республиканской конф. - Одесса, 1990. - С.112-113.

2. Крупельницький Л.В. Коррекция статических и динамических погрешностей аналоговых устройств в самокорректирующихся АЦП // Проблемы создания преобразователей формы информации. Тез. докл. 7-го симпозиума. - Киев, 1992. - С.78-79.

3. Стейскал В.Я., Крупельницький Л.В., Рафалюк А.Е., Лисюк В.В. Быстродействующий преобразователь код-ток в гибридном исполнении для высокоточных преобразователей формы информации // Технология

ГИС и вопросы их производства. Тез. докл. Второй Всесоюзной научно-технической конф. - Ярославль, 1988. - Ч.2. - С.108-109.

4. Азаров А.Д., Стейскал В.Я., Степайко Ю.М., Крупельницкий Л.В. ГИС устройства сравнения токов // Там же. - С.106-107.

5. Азаров А.Д., Стейскал В.Я., Крупельницкий Л.В., Герасимчук В.В. ГИС термостатированного источника опорного напряжения // Там же. - С.114.

6. Высокоточный самокорректирующийся микропроцессорный аналого-цифровой преобразователь САЦП-МКЗ. Стахов А.П., Моисеев В.И., Стейскал В.Я., Лисик В.В., Крупельницкий Л.В. и др. // Приборы и техника эксперимента. - 1989. - № 1. - С.97.

7. Высокоточный самокорректирующийся микропроцессорный преобразователь САЦП-МКЗ. Стахов А.П., Моисеев В.И., Стейскал В.Я., Крупельницкий Л.В., Майстришин В.Я. // Информационный листок о научно-техническом достижении № 88-006. - Винницкий ИТЦНТИ, 1988. - 5 с.

8. Азаров А.Д., Стейскал В.Я., Крупельницкий Л.В., Коваль О.В. ГИС термоститированного источника опорного напряжения для самокорректирующихся ПФИ // Проблемы создания преобразователей формы информации. Тез. докл. 6-го Всесоюзного симпозиума. - Киев, 1988. - С.201-202.

9. Моисеев В.И., Стейскал В.Я., Крупельницкий Л.В., Майстришин В.Я. САЦП-МКЗ - микропроцессорный аналого-цифровой преобразователь на основе кода "золотой пропорции" // Там же. - С.127-128.

10. Моисеев В.И., Крупельницкий Л.В., Майстришин В.Я., Левачкова И.С. Измерительный комплекс линеаризации характеристик датчиков на основе самокорректирующегося микропроцессорного АЦП. // Там же. - С.71-73.

11. А.С. № 1485309 СССР, МКИ G 11 C27/00. Аналоговое запоминающее устройство / Азаров А.Д., Стейскал В.Я., Голубев А.П., Крупельницкий Л.В. - Опубл. 07.06.89., Бюл. № 21.

12. А.С. № 1495993 СССР, МКИ H 03 M 1/26. Аналого-цифровой преобразователь / Стахов А.П., Моисеев В.И., Стейскал В.Я., Лм-

сюк В.В., Рафалюк А.Е., Васильева Т.Н., Крупельницкий Л.В., Майстришин В.Я. - Оpubл. 23.07.89, Бвл. N 27.

13. А.С. N 1529434 СССР, МКИ N 03 K 5/24. Входное устройство схемы сравнения токов / Азаров А.Д., Стейскал В.Я., Степайко Ю.М., Крупельницкий Л.В. - Оpubл. 15.12.89, Бвл. N 46.

14. А.С. N 1534440, МКИ G 05 F 1/56. Стабилизатор постоянного тока / Азаров А.Д., Стейскал В.Я., Крупельницкий Л.В., Волков В.П. - Оpubл. 07.01.90, Бвл. N 1.

15. А.С. N 1552231 СССР, МКИ G 11 C27/00. Аналоговое запоминающее устройство / Азаров А.Д., Стейскал В.Я., Голубев А.П., Крупельницкий Л.В. - Оpubл. 23.03.90., Бвл. N 11.

16. А.С. 1571761 СССР N03 M 1/46. Аналого-цифровой преобразователь / Стахов А.П., Моисеев В.И., Крупельницкий Л.В. и др. - Оpubл. 15.06.90, Бвл. N 22 .

17. А.С. N 1591182, МКИ N 03 M 1/46. Аналого-цифровой преобразователь / Крупельницкий Л.В., Стейскал В.Я., Азаров А.Д., Моисеев В.И. - Оpubл. 07.09.90, Бвл. N 33.

18. Рафалюк А.Е., Стейскал В.Я., Крупельницкий Л.В. Высокоточное интеграторное аналоговое запоминающее устройство // Методы и микроэлектронные средства цифрового преобразования и обработки сигналов. Тез. докл. конф. - Рига, 1990, -Т.1. - С.52-54.

19. Крупельницкий Л.В., Лысик В.В., Лушко О.Г. Термостабильный преобразователь код-ток повышенного быстродействия // Там же. - С.34-38.

20. Голубев А.П., Крупельницкий Л.В. Минимизация погрешностей восстановления звуковых сигналов в цифроаналоговом преобразователе // Там же. - С.21-23.

21. Моисеев В.И., Стейскал В.Я., Крупельницкий Л.В. Блок преобразования формы информации для измерителя параметров звуковых трактов // Проблемы и перспективы развития цифровой звуковой техники. Тез. докл. второй Всесоюзной научно-технической конф. - Ленинград, 1980. - С.65-66.

22. Майстришин В.Я., Крупельницкий Л.В., Стейскал В.Я. Параллельно-последовательный АЦП на основе избыточных систем счисления // Там же.- С.98-99.

23. Майстришин В.Я., Левачкова И.С., Крупельницкий Л.В. Моделирование статических погрешностей 16-разрядного самокорректирующегося АЦП // Вопросы проектирования и практического использования ПФИ в управляющих и вычислительных комплексах. Тез. докл. республиканской конф.- Одесса, 1990.- С.52-53.

24. Червинчук Н.В., Стейскал В.Я., Крупельницкий Л.В. Автоматизация контроля параметров трактов звукового вещания // Контроль и управление в технических системах. Тез. докл. научно-технической конф. стран СНГ. - Винница, 1992.- С.103.

25. Крупельницкий Л.В., Голубев А.П., Позняк Д.Ш., Скалозуб В.В. Анализатор параметров звуковых трактов на базе самокорректирующийся АЦП и ЦАП, сопряженных с ПЗВИ // Проблемы создания преобразователей форм информации. Тез. докл. 7-го симпозиума.- Киев, 1992.- С.123-124.

26. Высокоточный измерительный контроллер для работы с датчиками физических величин. Майстришин В.Я., Скалозуб В.В., Стейскал В.Я., Лысок В.В., Крупельницкий Л.В., Голубев А.П. // Там же.- С.57-58.

27. Положительное решение по заявке N 4677527 СССР, от 11.04.88. Входное устройство схемы сравнения токов. / Азаров А.Д., Стейскал В.Я., Степайко Ш.М., Крупельницкий Л.В.

28. Положительное решение по заявке N 7663950 СССР, от 20.03.89. Аналого-цифровой преобразователь. / Стахов А.П., Моисеев В.И., Крупельницкий Л.В. и др.

Подписано в печать 18.01.94 г.

Бумага офсетная.

Зак. № 2. Тир. 100 экз.

ВПП "Модуль", Хмельницкое шоссе 97

459.553

AB 29.063

AB 29.063