

Національна академія наук України
Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова

На правах рукопису

БАГАЦЬКИЙ Валентин Олексійович

ТЕОРІЯ ПОБУДОВИ, ПРОЕКТУВАННЯ ТА ПРАКТИЧНА
РЕАЛІЗАЦІЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ
ТА ЦИФРОАНАЛОГОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ
ЗАГАЛЬНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

05.13.08 — обчислювальні машини, системи та мережі,
елементи і пристрої обчислювальної техніки
і систем керування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ — 1995



00376228 (S)

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті кібернетики ім. В. М. Глушкова
Національної академії наук України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ФІЛІНЮК Микола Антонович,
доктор технічних наук, професор
СКРИПНИК Юрій Олексійович,
доктор технічних наук, професор
ВОЛОДАРСЬКИЙ Євген Тимофійович

Провідна організація: Державне підприємство «Науково-
дослідний інститут мікроприладів».

Захист відбудеться 5 жовтня 1995 р. на засіданні спеціалі-
зованої вченої ради Д 01.39.04 в Інституті кібернетики
ім. В. М. Глушкова НАН України за адресою:

252022 Київ 22, проспект Академіка Глушкова, 40.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічному
архіві інституту.

Автореферат розісланий «21» серпня 1995 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

ГУМЕНЮК-СИЧЕВСЬКИЙ В. І.

ЛННБ ім. В. Стефаника
АН України

AB-32.897

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Структурна перебудова та модернізація промисловості України повинні призвести до значного підвищення ефективності виробництва і поліпшення якості продукції, що випускається. Для цього необхідно найширше впроваджувати автоматизовані системи в керування технологічними процесами та устаткуванням, обладнання нових виробництв сучасними засобами автоматизації на основі цифрової мікропроцесорної техніки.

Зв'язок мікропроцесорів з устаткуванням, у якому керуючі впливи та сигнали зворотного зв'язку з давачів мають безперервний характер, здійснюється через аналого-цифрові та цифроаналогові перетворювачі (АЦП та ЦАП) сигналів ДСП у цифровий код.

АЦП, ЦАП та інші засоби перетворювальної техніки конструктивно виготовляються у вигляді монолітних, гібридних ІС та модулів. Монолітні ІС перетворювальної техніки розроблялись в Росії і країнах Балтії.

В Україні перетворювачі у вигляді гібридних ІС випускаються у Львівському ВО "Мікроприлад", а модульні перетворювачі - у НВО "Імпульс" (Севеодонецьк), ВО "Електронмаш", ВО "Точелектроприлад" (КП "Госток"), ВО ім.С.П.Корольова (Київ). У гібридних та модульних перетворювачах як компоненти використовуються монолітні перетворювальні ІС, тому розпад СРСР призвів до значних труднощів у виробництві перетворювачів в Україні. Необхідність автоматизації розвинених в Україні машинобудівної, металургійної та хімічної галузей промисловості робить актуальною задачу проектування і опанування у виробництві власних засобів перетворювальної техніки.

Значний внесок у розробку теорії перетворювальної техніки внесли В.Б.Смолов, Е.І.Гітис, А.І.Кондалев, Г.М.Петров, В.М. Шлядін, О.П. Стахов, М.П. Паленко, О.М. Касперович, Ю.М. Туз, П.П.Орнатський, В.І.Швецький, Ю.О.Скрипник, Є.О.Чернявський, А.Ф.Верлань та фахівці очолюваних ними шкіл. У роботах цих та інших авторів знайшли глибокий і вичерпний розгляд методи та алгоритми перетворення і кодування інформації, нові структури перетворювачів, використання у перетворювальній техніці нетрадиційних систем чис-

лення, елементна база перетворювачів, нові технічні рішення конкретних пристроїв. Проте практично відсутні теоретичні роботи, де розглядаються перетворювачі як об'єкт наскрізного проектування та виготовлення на всіх рівнях деталізації - від системного до технологічного. Хоча перетворювачі, які інтуїтивно можна віднести до класу загального застосування і складають основний обсяг серійного випуску перетворювачів на підприємствах електронної та приладобудівної галузей промисловості, теорії побудови та проектування перетворювачів загального застосування немає. Тому тема реферованої роботи уявляється вельми актуальною.

Основи для виконання роботи. Тема згідно з постановою Президії АН УРСР N 437 від 29.11.74 "Разработать принципы построения и создать типовые модели аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей для малых ЭВМ".

Завдання 0.80.14.33.16 згідно з постановою ДКНТ, Держплану, АН СРСР N475/251/131 від 12.12.80 "Разработать быстродействующие преобразователи формы информации на базе БИС и микропроцессоров для устройств аналого-цифрового сопряжения".

Наказ-постанова Мініприладу та АН СРСР N58 /26 від 06.03.81 "О дальнейшем развитии совместных работ по созданию систем автоматизации научных экспериментов в 1981-1985 гг.".

Завдання 0.80.01.21.1 згідно з постановою ДКНТ N555 від 30.10.85 "Провести НИР и создать опытные образцы ряда преобразователей формы информации для использования в ЭВМ новых поколений и рабочих станциях на основе персональных ЭВМ".

Проект "Розробити типові проблемно-орієнтовані комплекси для автоматизації виробничих процесів" Державної науково-технічної програми України 6.3.1 "Високопродуктивні ЕОМ і проблемно-орієнтовані комплекси широкого призначення".

Метою роботи є розробка теорії побудови аналого-цифрових та цифроаналогових перетворювачів загального застосування на різних рівнях їх організації.

Задачі досліджень. При виконанні роботи вирішувались наступні задачі:

1. Знайти конструктивне визначення класу "перетворювач загального застосування".

2. Розробити методику визначення технічного рівня та якості перетворювачів.

3. Дослідити можливості для обробки інформації безпосередньо у перетворювачах.

4. Розробити методику проектування перетворювачів на рівні електричних схем.

5. Оцінити вплив виробничих розкидів параметрів компонентів на параметри перетворювачів і запропонувати заходи по його зменшенню для конструктивного виконання АЦП та ЦАП у вигляді ГІС і модулів.

6. Виконати розробку конкретних зразків перетворювачів і здійснити їх впровадження у промисловість.

Методи досліджень. У роботі використані методи математичної статистики та багатокритеріальної оптимізації, основи теорії обчислювальних машин, методи розрахунку лінійних і нелінійних електричних ланцюгів та моделювання на ЕСМ.

Наукова новизна. Основним науковим результатом є розроблена теорія побудови аналого-цифрових та цифроаналогових перетворювачів загального застосування на різних рівнях їх організації з використанням багатокритеріального підходу.

Розроблені нові теоретичні положення та науково обґрунтовані технічні рішення, які внесли помітний внесок у науково-технічний прогрес, конкретизуються наступними новими науковими результатами.

1. Виконані моніторингові дослідження АЦП та ЦАП, що випускаються промисловістю індустріально розвинених країн світу, починаючи з 1964 р. і до 1990 р. Дослідження показали, що основні системні параметри взаємозалежні і не є ортогональною системою.

2. З урахуванням взаємозв'язку параметрів розроблена єдина методика кількісної оцінки таких інтегральних характеристик перетворювачів як технічний рівень, якість і ступінь спеціалізації, причому вказані три характеристики визначені відносно всієї чисельності перетворювачів, що випускаються.

3. Розроблено конструктивне визначення класу перетворювачів загального застосування, кожний з яких має рівні або близькі основні нормовані параметри. Визначено напрямок розробок перетворювачів загального застосування та конкретні параметри перспективних АЦП загального застосування.

4. Розроблена дворівнева методика проектування перетворювачів на рівні електричних схем, за якою на рівні однорозрядних перетворювачів запропоновані еквівалентні схеми макромоделей АЦП та

ЦАП, визначені функції впливу параметрів компонентів залежно від режимів їх роботи на параметри перетворювачів, виконана оптимізація параметрів макромоделей.

5. Отримані залежності точності та швидкодії від режимів роботи для однорозрядних перетворювачів дозволили виконати на ЕОМ розрахунки точності та швидкодії найбільш розповсюджених багаторозрядних структур ЦАП та АЦП. Визначені точки діапазону, де похибки та час наростання максимальні. Виконаний кількісний порівняльний аналіз структур ЦАП по точності, швидкодії та інших параметрах.

6. Розроблена автоматизована методика добору комплекту компонентів для безпідстроювального виготовлення модульних ЦАП, за якою здійснюється вимірювання параметрів всіх компонентів, що використовуються, за якими підбираються комплекти згідно з розрахованими нормами.

7. Запропоновано розширення можливостей перетворювачів загального застосування за додатковою обробкою сигналів проводити у напрямку перетворення - контроль - розпізнавання. Виконана класифікація пристроїв контролю сигналів за формою представлення інформації, з якою виконуються операції запам'ятовування та порівняння відліків. Запропоновані оригінальні пристрої контролю сигналів на основі перетворювачів.

Достовірність досліджень підтверджена обчислювальними експериментами над моделями на ЕОМ, експериментальним обґрунтуванням вигляду і параметрів моделей однорозрядних перетворювачів та експериментальними даними по вимірюванню параметрів багаторозрядних перетворювачів і порівнянням їх з теоретично отриманими значеннями.

Практична цінність. Розроблена теорія побудови перетворювачів дозволяє об'єктивно оцінити технічний рівень перетворювачів, визначити об'єктивні оцінки їх якості, передбачити параметри перспективних перетворювачів загального застосування, при заданих обмеженнях одержати максимальні точність або швидкодію перетворювачів, підвищити точність модульних пристроїв і знизити кількість повірочних точок при випуску перетворювачів. Розроблена технологія виготовлення модульних перетворювачів, за якою виключені операції підстройки.

Використання у промисловості. Наукові результати роботи використані у НДІ "Вента" (Вільнюс), при розробці ІС цифроаналогових

перетворювачів типів K594ПА1 та K1118ПА1, Київському ВО ім. С.П.Корольова, Київському ВО "Точелектроприлад".

Розроблений під керівництвом і за участю автора модуль аналого-цифрового перетворювача Ф5286 випускався Київським ВО "Точелектроприлад" серійно у складі вимірювально-обчислювальних комплектів ІВК-20, ІВК-25, ІВК-6. Впродовж 1983-1990 рр. випущено більш як 1050 екземплярів модулів.

Під керівництвом і за участю автора розроблений та серійно випускається з 1992 р. колективним підприємством "Росток" (колишній "Точелектроприлад") модуль введення безперервних сигналів ФФ5005. До 31.12.93 випущено 287 екземплярів модуля ФФ5005.

Для серійного випуску на Київському ВО ім.С.П.Корольова розроблені модулі АПП та ЦАП для ІВК аналізу та обробки сигналів.

Дослідним заводом СКБ ММС Інституту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України у складі ПЗО "Сектор" дрібною серією випущено більше 50 екземплярів модулів ЦАП з компаратором ЦАП 043.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідались на II, III, IV, V, VI, VII Всесоюзних симпозиумах "Проблеми створення перетворювачів форми інформації" (Київ, 1973, 1976, 1980, 1984, 1988, 1992);

на міжнародній конференції по АПП та ЦАП (Швейцарія, м.Лозанна, 1973);

на Всесоюзній конференції "Математичне моделювання на суцільних і дискретних середовищах (Київ, 1974);

на конференції "Методи і мікроелектронні засоби цифрового перетворення та обробки сигналів" (Рига, 1989);

на Всесоюзній конференції "Оцінка технічного рівня і якості АСУ ТП" (Ростов-Великий, 1990);

на республіканських конференціях "Питання теорії і проектування перетворювачів форми інформації" (Київ, 1974 ; Одеса, 1978, 1990 ; Вінниця, 1982 ; Тернопіль, 1986).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 64 друковані роботи, у тому числі чотири монографії у співавторстві, отримано вісім авторських свідоцтв.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, семи глав, висновків, переліку літератури (232 найменування), і містить 254 сторінки машинописного тексту, 93 рисунки, 20 таблиць.

ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить обґрунтування актуальності проблеми розробки теорії аналого-цифрових та цифроаналогових перетворювачів загального застосування (ЗЗ). Перетворювачі аналізуються у роботі на різних ієрархічних рівнях організації. На найбільш високому рівні, системному, перетворювачі визначаються декількома системними параметрами, на структурному рівні наводиться та описується його загальна структурна схема, яка потім деталізується на рівні електричних схем. На технологічному рівні розробляється технологія конструктивного виготовлення перетворювачів. Визначені цілі та основні задачі, які вирішуються стосовно до вказаних рівнів організації.

У першій главі виконані моніторингові дослідження АПП та ЦАП, що випускаються промисловістю індустриально розвинених країн світу, починаючи з 1964 р. і до 1990 р. Відомості про характеристики всієї сукупності перетворювачів, що випускаються з 1964 р. і до 1990 р., представлені у дисертації у вигляді гістограм їх основних системних параметрів, проаналізовані також основні структури та технології виготовлення перетворювачів.

АПП 1990 р. конструктивно виготовлялися у вигляді ІС з використанням КМОН (50%), комбінованої (10%) і біполярної (40%) технології. У перетворюючій частині АПП у 50% ІС реалізований паралельний метод перетворення, у 35% ІС - метод послідовних наближень, у 6% ІС застосовується паралельно-порозрядний алгоритм, а у інших ІС високоточних АПП використовується метод дельта-сигма модуляції. З аналізу гістограм випливає, що швидкодія АПП, виготовлених за КМОН технологією, ненабагато поступає швидкодії АПП біполярної технології, що досягнуто у тому числі за рахунок використання паралельних структур. Потужність, споживана АПП біполярної технології, зменшилась практично до рівня потужності АПП КМОН технології.

ЦАП 1990р. конструктивно виконані у вигляді ІС із застосуванням біполярної (60%), комбінованої (6%), КМОН (34%) технологій. Половина ІС ЦАП, що випускаються, підключається безпосередньо до шини мікропроцесорної системи, у 35% ІС є внутрішнє джерело опорної напруги. Точність і швидкодія ІС ЦАП практично не залежать від типу вихідної величини (напруги, струму) та технології виготовлення. ЦАП біполярної технології з виходом по напрузі споживають найбільшу

потужність, а ЦАП КМОН технології з виходом по струму - найменшу.

Моніторингові дослідження дозволили визначити тенденцію розвитку перетворювальної техніки у кожний даний момент часу і встановити, що основні параметри перетворювачів взаємопов'язані і не є ортогональною системою.

У другій главі розроблена методика кількісної оцінки технічного рівня, якості і ступеня спеціалізації перетворювачів. Багатомодальні гістограми розподілень кількості моделей перетворювачів за їх параметрами розділяються на унімодальні за якісною ознакою. Унімодальні гістограми наближаються деякою стандартною, наприклад нормальною функцією, якій відповідає нормуюча функція

$$Z_{ji} = (p_{ji} - p_j) / S_{pj}, \quad (1)$$

де p_{ji} - значення j параметра i -ї моделі; p_j - емпіричне середнє (перший момент) j -го параметра; S_{pj} - оцінка середньоквадратичного відхилення (другий момент) j -го параметра.

Більш точно гістограми наближаються функціями Джонсона, у яких використовуються чотири параметри гістограми

$$f_d(p_{ji}) = \frac{n_j \lambda_j}{\sqrt{2\pi} (p_{ji} - \epsilon_j) (\lambda_j + \epsilon_j - p_{ji})} \exp \left(-\frac{1}{2} \left[r_j + n_j \ln \left(\frac{p_{ji} - \epsilon_j}{\epsilon_j + \lambda_j - p_{ji}} \right) \right]^2 \right), \quad (2)$$

де ϵ_j , $\epsilon_j + \lambda_j$ - відповідно нижнє та верхнє значення; r_j , n_j - коефіцієнти зміщення та масштабний відповідно.

Наближаючій функції (2) відповідає нормуюча функція

$$Z_{ji} = r_j + n_j \ln [(p_{ji} - \epsilon_j) / (\epsilon_j + \lambda_j - p_{ji})]. \quad (3)$$

Функції (1) та (3) перетворюють кожне значення параметра у безрозмірну величину, а гістограми - у нормовані нормальні. Похибка наближення гістограм оцінюється величиною $\delta x^2 = x^2/M$, де x^2 - відомий із статистики критерій Пірсона; M - кількість моделей АПП. Наприклад, похибки наближення гістограм розподілень АПП 1981 р. за точністю і частотою видачі відліків функцією f_n дорівнюють відповідно 0,167 і 0,171; а похибки наближення функцією f_d відповідно дорівнюють 0,158 і 0,166.

Для нормування рекомендується використовувати функцію f_d , якій відповідають менші похибки наближення, а для моделей спеціалізованих перетворювачів з окремими "рекордними" параметрами необхідно застосовувати функцію f_n .

На рис.1 відтворена область існування АПП у координатах, нормованих за (3) значень точності n і частоти видачі відліків lgF .

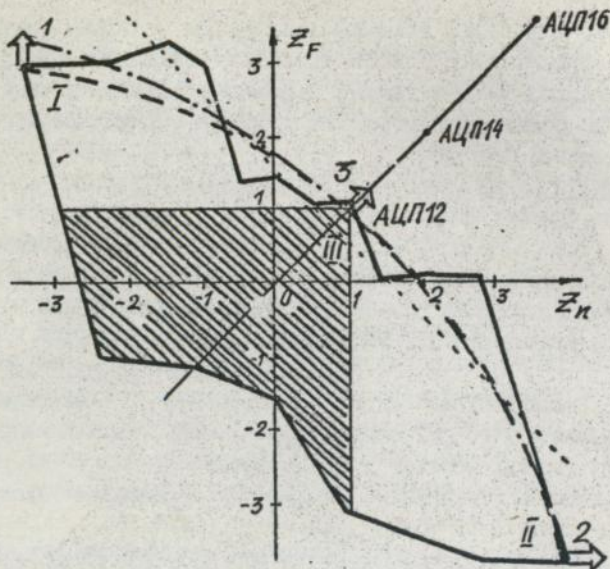


Рис.1. Область існування АЦП в координатах Z_n , Z_F та пряма, коло, гіпербола, які наближують межу. Межа області існування, яка відповідає кращим моделям, наближається деякою стандартною кривою другого порядку, наприклад колом з параметрами R (радіус), a , b (координати центру). R , a , b визначають технічний рівень розробок АЦП, обчислюються згідно з методом найменших квадратів і для рис.1 $R=11,2$; $a=6,75$; $b=7,2$. Похибка $\delta x^2/M$ наближення колом дорівнює 0,139. Наближенню колом відповідає цільова функція, еквівалентна відстані від центру кола до точки Z_{F1} , Z_{n1} .

$$C_{01} = \sqrt{(Z_{F1}+b)^2 + (Z_{n1}+a)^2}. \quad (4)$$

Значення C_{01} для i -ї моделі АЦП кількісно характеризує її якість, причому якість тим вища, чим більше значення C_{01} .

Наближення гіперболою з параметрами p (піввісь гіперболи), a , b (координати її центру), $A=p^2/2$ дозволяє знизити похибку апроксимації до 0,135. Величини p , a , b визначають технічний рівень і для рис.1 $p=7,07$; $a=6,61$; $b=5,46$. Наближаючій гіперболі відповідає цільова функція, еквівалентна відстані від центру зміщених ко-

ординат до гіперболи, що проходить через точку Z_{F1} , Z_{n1} :

$$C_{T1} = \sqrt{2(Z_{F1}-b)(Z_{n1}-a)} \quad (5)$$

Для цієї цільової функції підвищення якості відповідає зменшенню C_T .

Як цільову рекомендується використовувати функцію з найменшою похибкою наближення, у даному випадку C_T , а для оцінок спеціалізованих АПП з окремими "рекордними" параметрами використовується функція C_0 .

Області I і II рис.1 симетричні відносно прямої $Z_n - Z_F$. Чим далі від неї знаходиться АПП з параметрами Z_{n1} , Z_{F1} , тим більше він спеціалізований. Перетворювачі, що лежать біля прямої $Z_n - Z_F$ в області III, мають близькі нормовані параметри і тому можуть бути названі неспеціалізованими або загального застосування. Кількісно ступінь спеціалізації визначений як розкид нормованих безрозмірних параметрів Z_{ji} від їх середнього значення I_i , що відповідає виразу для середньоквадратичного відхилення

$$I_i^* = \frac{1}{\sqrt{k-1}} \sqrt{(Z_{1i}-I_i)^2 + (Z_{2i}-I_i)^2 + \dots + (Z_{ki}-I_i)^2} \quad (6)$$

де k - кількість параметрів, що бере участь у оцінці;

$I_i = (Z_{1i} + Z_{2i} + \dots + Z_{ki}) / k$ - середнє значення.

Для перетворювачів загального застосування $Z_{1i} = Z_{2i} = \dots = Z_{ki} = I_i$ або $I_i^* = 0$. Чим вище ступінь спеціалізації, тим більше I_i^* .

Для двовірного випадку (див.рис.1) існує три основних напрями розробок АПП: 1 - підвищення швидкості швидкодіючих АПП; 2 - підвищення точності високоточних АПП; 3 - підвищення швидкості та точності одночасно для АПП загального застосування. Параметри перспективних 12-16-розрядних АПП загального застосування наведені у табл. 1.

Створені у напрямку 3 АПП можуть замінити найбільшу кількість АПП, що вже випускаються, оскільки f_n и f_d перетворюють вихідні гістограми у нормовані нормальні. На рис.1 заштрихована область пристроїв, що замінюються кращим АПП загального застосування - АПП 12. Велика кількість типів перетворювачів, що замінюються, може забезпечити великий діапазон застосувань, отже, великий обсяг випуску АПП загального застосування, що необхідно для їх розробки у вигляді ІС. АПП 16 у сукупності параметрів n та F зміг би замінити усі перетворювачі, які виготовляються, та став би, таким чином,

Таблиця 1
Параметри АПП загального
застосування

Тип перетво- рювача	Точність л,біт	Час пере- творення мкс
АПП 12	12	5
АПП 13	13	1
АПП 14	14	0,2
АПП 15	15	0,05
АПП 16	16	0,01



Рис.2. Область існування АПП в
координатах Z_n, Z_F, Z_p та
куля, яка наближає межу

ває з глав 1,2, являють собою паралельні структури з вихідною матрицею R-2R або комбінованого типу, де виконується комутування розрядних струмів. АПП ЗЗ складаються з вхідного вузла, що перетворює $U_{вх}$ в струм, компаратора струмів, паралельного ЦАП з комутуванням розрядних струмів і працюють за методом порозрядного врівноваження. Із-за складності електричних схем АПП та ЦАП, що містять тільки у аналого-цифровій частині 150-200 нелінійних компонентів типу

універсальним. Докази технічної можливості або неможливості створення такого перетворювача мають велике теоретичне та практичне значення.

На рис.2, виконаному за допомогою комп'ютера, показана область існування АПП, і готовлених за біполярною технологією, у координатах, нормованих за (2), параметрів $n, \lg F, \lg P_m/P_1$ та апроксимація поверхні кращик АПП кулею з координатами центру $a-b-c-5$ і радіусом $R=9,6$. На рис.2 помітні частини поверхні кращик АПП, які знаходяться над апроксимуючою кулею. Параметри перспективних АПП біполярних технологій загального застосування з урахуванням споживаної потужності відповідно дорівнюють: $n_1-12, t_{пр1}-1,2$ мкс, $P_1-0,5$ Вт; $n_2-14, t_{пр2}-0,1$ мкс, $P_2-0,25$ Вт; $n_3-16, t_{пр3}-0,01$ мкс, $P_3-0,12$ Вт.

У третій главі розроблена дворівнева методика проектування перетворювачів на рівні електричних схем, запропоновані і досліджені макромоделі однорозрядних перетворювачів.

Кращі ЦАП ЗЗ, як це впливає

транзистора з 20-40 параметрами, запропоновано декомпозицію повної схеми проводити на рівнях елементарних (однорозрядних) перетворювачів і багаторозрядної структури.

Для розрахунку похибок однорозрядних АЩП та ЦАП використані модель транзистора Ерлі та нелінійний ключовий елемент з генераторами струмів зитікання, а для оціночних розрахунків швидкодії діод моделюється ключовим елементом із залежною від напруги або струму затримкою у ланцюгу керування, а транзистор - спрощеною передавальною моделлю Еберса - Молла. Перехідний процес в однорозрядних струмових ЦАП, що складається з джерела струму (ДС), діодного або транзисторного струмового комутатора (СК) та навантаження (Н), поділений на декілька ділянок, на кожній з яких перехідний процес розраховується шляхом розв'язання лінійних диференціальних рівнянь першого порядку.

Для еквівалентної схеми рис.3,а реактивності C_n , $C_{дс}$, L_n , $t_{з1}$, $t_{з2}$ визначають швидкодію схеми. Встановлено, що на час наростання і спаду $U_{вих}$ та $I_{вих}$ значний вплив чинять режими форсування. З урахуванням форсуючого впливу джерела керуючих напруг розраховано час наростання та спаду $U_{вих}$. Для схеми рис. 3,б

$$(t_{з1} - t_1)L - \tau_{н,вн} \ln(1 - I_0 \cdot (R_{вн} + R_n) / I_1 \cdot R_n), \quad (7)$$

$$(t_{з2} - t_2)L - \tau_{н,вн} \ln\left(- \frac{I_0 \cdot R_{вн} / (R_n + R_{вн})}{I_2 \cdot R_n / (R_n + R_{вн}) - E_2 / R_{вн}}\right), \quad (8)$$

де $\tau_{н,вн} = L_n / (R_n + R_{вн})$; $I_1 = I_0 + E_1 / R_{вн}$; $I_2 = I_0 + E_2 / R_{вн}$; I_0 - вихідний струм ДС; E_1 , E_2 - рівні керуючих напруг; $R_{вн}$ - внутрішній опір джерела керуючих напруг.

Для рис.3,в затримка наростання $U_{вих}$ дорівнює

$$(t_{з1} - t_1)C_{дс} = (E_2 + I_0 \cdot R_{вн})C_{дс} / I_0, \quad (9)$$

де $C_{дс}$ - вихідна ємність ДС.

Після затримки $U_{вих}$ наростає від нуля по експоненті з $\tau_{н,вн} \cdot C_{дс}$. Спад $U_{вих}$ відбувається практично лінійно, його час розраховується згідно з формулою

$$(t_{з2} - t_2)C_{дс} - \tau_{дс} \ln \frac{I_2}{I_2 - I_0(R_n + R_{вн}) / R_{вн}}. \quad (10)$$

Таким чином, L_n навантаження, а також затримки відключення ключових елементів призводять до викидів $U_{вих}$, а наявність C_n і $C_{дс}$ - до затримок та затягування фронтів. Протилежний характер впливу

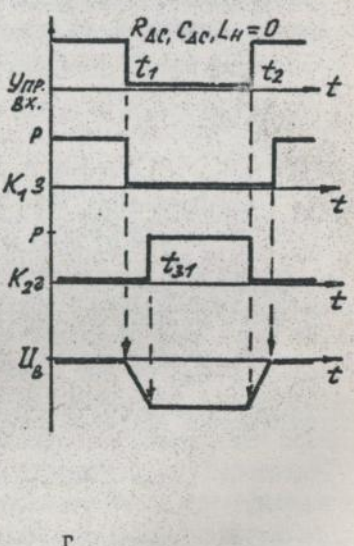
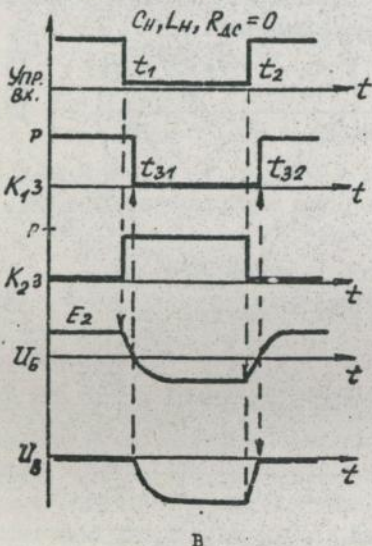
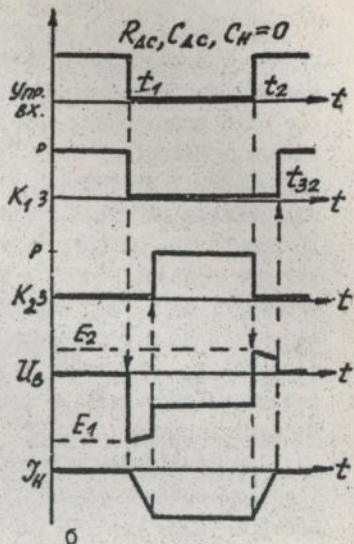
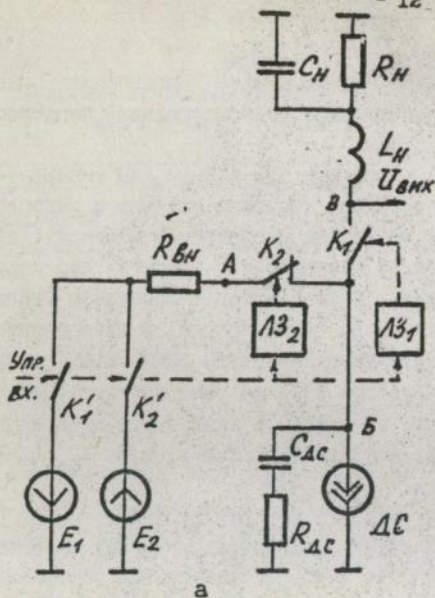


Рис.3. Еквівалентна схема однофазного ДАП з діодним СК і діаграми її переключення

цих реактивностей дозволяє взаємно компенсувати їх негативний вплив на час наростання і зменшити його до частини τ_n , як це показано на рис.3,г. Визначено співвідношення, яке дозволяє обирати ключовий діод в накопиченням заряду за параметром "час відновлення зворотного опору" t_v для заданого $C_{дс}$ для отримання найменшого часу наростання $U_{вих}$

$$t_v = (R_n + R_{вн})C_n \cdot \ln \left[1 - \frac{I_0 R_n}{R_n I R_{вн} \cdot I_1} \right] \quad (11)$$

В імпульсних діодах КД512А, КД503Б, Д220 час відновлення зворотного спору дорівнюють 1нс, 10 нс, 0,5 мкс відповідно. Виходячи з (11), для отримання максимальної швидкодії ЦАП АЦП-33 як ключові діоди застосовані діоди КД503Б, а не діоди КД512А.

На рис.4 r_6 , r_e - параметри великого сигналу моделі транзистора Еберса - Молла. На рис.5 показані часові діаграми перемикання однорозрядних ЦАП, у яких основними реактивностями є C_{e2} , C_{e1} , $C_{к1}$.

Якщо основною реактивністю схеми є C_{e2} , то у момент часу t_1 вихідний струм ЦАП дорівнює $I_{дс} + I_0$, який потім зменшується по експоненті з постійної часу τ_1 до значення $I_{дс}$.

$$\tau_1 = (2r_6 + 2r_e + R_{вн}) \cdot C_{e02}; \quad I_0 = \frac{E_1 - U_{см} - U_{пр}}{2r_6 + 2r_e + R_{вн}} \quad (12)$$

Якщо основною реактивністю схеми є C_{e1} , то затримка включення

$$t_{з1} = t_1 - (U_{см} - E_2)C_{e21}/I_{дс} \quad (13)$$

У момент часу t_2 ток ДС ділиться між T_1 , T_2 і залишається таким до того часу, доки C_{e01} не розрядиться. Час затримки

$$t_{з2} = t_2 - \frac{U_2 \cdot C_{e01}}{I_p} = \frac{U_2 \cdot C_{e01}}{(U_{см} - E_2)} (2r_6 + 2r_e + R_n) \quad (14)$$

де U_2 - відмінність між $U_{пр}$ і напругою закривання переходу. Після t_2 вихідний струм зменшується згідно з (15)

$$I_{вих2} = I_{дс} \cdot \exp \left(- \frac{t - t_{з2}}{C_{e21}(2r_6 + 2r_e + R_{вн})} \right) \quad (15)$$

Якщо основною реактивністю є ємність навантаження C_n , то передні і задні фронти є експоненти з $\tau = C_n \cdot R_n$. Ємність $C_{дс}$ впливає на передній фронт сигналу подібно ємності C_{e1} , а вплив $C_{к1}$ еквіва-

Сучасні АПП та ЦАП проектується і використовуються у комплексі з великою кількістю буферних пристроїв, що дозволяє у процесі проектування власне АПП та ЦАП обирати значення вихідного струму ДС та резистора на навантаження таким чином, щоб забезпечити найбільші значення точності або швидкодії, для чого необхідно вирішувати задачу оптимізації параметрів.

Швидкодія однорозрядного ЦАП (див.рис.3,а), визначається постійною часу τ вихідного ланцюга ДС:

$$\tau = (R_H + R_{ДС}) \cdot C_{ДС} \quad (16)$$

У виразі (16) R_H та $C_{ДС}$ залежать від діапазону вихідної напруги $U_{вих}$ і вихідного струму ДС $I_{ДС}$.

$$R_H = U_{вих} \cdot I_{ДС}; \quad C_{ДС} = C_{к.б} + C_{к.д} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{1} \sqrt{\frac{\Delta \Phi_0}{U_{вих}}} + \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon}{2qN_d}} \cdot \frac{\omega I_{ДС}}{D \sqrt{U_{вих}}} \quad (17)$$

де N_d , D , ϵ , $\Delta \Phi_0$, S , l_0 , ω - параметри напівпровідника та геометричні параметри вихідного транзистора ДС; ϵ_0 - діелектрична проникність вакууму; q - елементарний заряд; $U_{вих}$, $I_{ДС}$ - вихідна напруга ЦАП та струм ДС.

$R_{ДС}$ є опором активної ділянки бази та з'єднувального шару $\Gamma_б$ вихідного транзистора ДС і від U та I не залежить:

$$\tau = \left(\frac{U_{вих}}{I_{ДС}} + \Gamma_б \right) \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon}{l_0} \sqrt{\frac{\Delta \Phi_0}{U_{вих}}} + \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon}{2qN_d}} \cdot \frac{\omega \cdot I_{ДС}}{D \sqrt{U_{вих}}} \right) \quad (18)$$

Постійна часу τ є функцією двох змінних $U_{вих}$ та $I_{ДС}$, які для мінімального τ визначаються відомими методами:

$$I_{ДСопт} = I_0 \cdot C_{к.б} / C_{к.д}; \quad U_{вихопт} = I_{ДСопт} \cdot \Gamma_б; \quad R_{нопт} = \Gamma_б, \quad (19)$$

де I_0 - струм транзистора, за яким вимірюються $C_{к.б}$ і $C_{к.д}$.

Розрахунки доведи, що для збільшення швидкодії ЦАП необхідно збільшувати $I_{ДС}$ аж до максимально припустимого і зменшувати R_H до значення $\Gamma_б$. Вибір найкращих значень $I_{ДС}$ та R_H впливає також на час спрацювання компаратора у схемі АПП. Доведено, що R_H та $U_{вих}$ доцільно зменшувати для скорочення загального часу затримки у ланцюзі ЦАП - компаратор.

Запишемо вираз для оцінки повної похибки однорозрядного ЦАП γ_n залежно від $I_{ДС}$ та $U_{вих}$:

$$\gamma_n = 1/U_{вих} \left(\frac{1}{B} + \frac{A}{U_{оп}} \right) + 1/U_{вих} \left[\gamma_{U_{сб}} \cdot R_{пс} \frac{I_0}{U_{оп}} + \gamma_{I_{сб}} R_{пс} \right], \quad (20)$$

де 1 , A , B - постійні, залежать від типу вихідного транзистора і

не залежать від струму та колекторної напруги на ньому; $U_{оп}$ - опорна напруга; $R_{пс}$ - тепловий опір перехід-середовище вихідного транзистора; $\gamma_{U_{сб}}$, $\gamma_{I_{сб}}$ - температурні коефіцієнти $U_{сб}$ і $I_{сб}$, які залежать від струму через вихідний транзистор.

Для двох типів ДС згідно з (20) розраховані похибки для різних $I_{дс}$. Похибки, отримані експериментально у реальному діапазоні струмів ДС 0,5-20 мА, відрізняються від розрахункових не більше ніж на 30%. Як витікає з виразу (20) та експериментальних досліджень, похибки однорозрядних ЦАП збільшуються із збільшенням $I_{дс}$ та $U_{вих}$.

Запропоновані структурні схеми компараторів напруги та струму зображені на рис.6, де ВН, ВС - від'ємники напруг та струмів; ОН, ОС - обмежувачі напруг та струмів; ПН, ПТ - підсилювачі напруг та струмів; Г_{др} - генератори дрейфів напруг та струмів; Г_{с.п} - генератор напруги синфазної похибки.

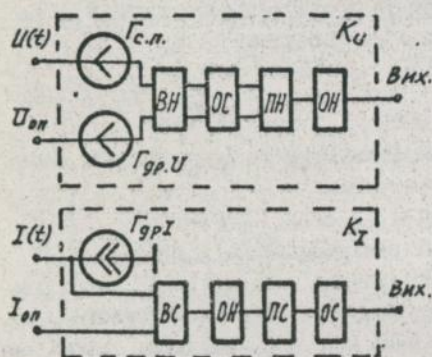


Рис.6. Структурні схеми компараторів напруг(а) та струмів (б)

Для компаратора U K_I може дорівнювати одиниці. У реальних схемах $I_{вх}$ обмежується $R_{диф}$ від'ємника. Для зменшення похибок, що вносяться вхідними ланцюгами компаратора у похибку АЦП, необхідно збільшувати $I_{дс}$ та $U_{вих}$ ЦАП. Найкращі з точки зору найменшої похибки режими визначені графічно (рис.7). Місця перетинання кривих похибок ЦАП і компаратора для однакових $I_{дс}$ з'єднуються кривою, мінімум якої визначає оптимальні значення $I_{дс}$ та $U_{вих}$. Знайдені для однієї з розроблених автором схем оптимальні значення дорівнюють $U_{вихопт} = 2,5$ В; $I_{дсопт} = 2,5$ мА; $\gamma_{min} = 0,1$ %.

У четвертій главі виконаний аналіз багаторозрядних перетворювачів за критеріями точності, швидкодії та деякими іншими технологічними параметрами. Запропонована і проаналізована структура АЦП з порівнянням струму.

Для наближеної оцінки швидкодії у роботі визначені характер та ступінь впливу кожного окремого параметра еквівалентної схеми (див.рис.4) на час установлення вихідної величини. Припустимо, що СК гранично швидкий. Швидкодія кожної структури ЦАП визначається процесами заряду-розряду вихідної ємності C_p розрядних ланцюжків.

У структурі ЦАП із зваженими ДС ємністю навантаження для кожного розряду є сума всіх розрядних вихідних ємностей C_p . Установлення $U_{вих}$ відбувається експоненціально. Час установлення визначається згідно з виразом $t_{уст.н} = K_1 \cdot \tau_n$, де $\tau_n = R_n \cdot \sum C_{pi}$, K_1 - коефіцієнт, залежний від потрібної точності, n - кількість двійкових розрядів.

Комбінована структура ЦАП складається з двох або більше груп розрядів, у кожній з яких зважені розрядні ДС, а групи з'єднані через вихідний дільник, і для двох груп структура описується системою з двох операторних рівнянь:

$$\begin{aligned} (1/R_{d1} + p \cdot l \cdot C_p) \cdot \bar{U}_1 - \bar{U}_2/R_{d1} &= (\alpha_1 \cdot l_1 + \dots + \alpha_l \cdot l_l)/p, \\ -\bar{U}_1/R_{d1} + p \cdot l \cdot C_p \cdot \bar{U}_2 &= (\alpha_{l+1} \cdot l_{l+1} + \dots + \alpha_n \cdot l_n)/p, \end{aligned} \quad (22)$$

де R_{d1} , R_{d2} - опори вихідного дільника; l - кількість розрядів у групі; n - загальна кількість розрядів; $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in 0;1$. Наближене рішення (з похибкою не більш 0,2%) цієї системи

$$\begin{aligned} U_{вих} = & [\exp(-t/\tau_{ст}) - 1] \cdot (R_{d1} + R_{d2}) \cdot (\alpha_1 \cdot l_1 + \dots + \alpha_l \cdot l_l) + \\ & + [\exp(-t/\tau_n) - 1] \cdot R_{d2} \cdot (\alpha_{l+1} \cdot l_{l+1} + \dots + \alpha_n \cdot l_n), \end{aligned} \quad (23)$$

де $\tau_n = R_{d1} \cdot l \cdot C_p$, $\tau_{ст} = (R_{d1} + R_{d2}) \cdot l \cdot C_p$; $R_{d2} < R_{d1}$. Кінцеве значення $U_{вих}$ та потрібна точність його встановлення заздалегідь відомі, тому $t_{уст.н}$ визначається досить просто.

Для структури ЦАП з вихідною матрицею R-2R, у якій вихідні ємності розрядних ланцюжків C_p розподілені за всіма вузлами матриці і їх взаємний вплив відчутний, при $R_{вих} = \infty$ складена система диференціальних рівнянь, вирішена відносно $U_{вих}$ з подальшим визначенням $t_{уст.н}$ кількісним методом на ЕОМ.

У реальних ЦАП інерційні властивості СК впливають на $t_{уст}$ у відповідності із співвідношеннями (12) - (15). З урахуванням залежностей $\tau_e = 26 \text{ мВ/І}_{ит}$, $C_{eo} = 1/2\pi f_T \tau_e$ від струму ДС виконаний розрахунок часів установлення та затримок $U_{вих}$ для основних структур.

В основних структурах ЦАП виконується зважування за рахунок зміння R_e джерел струмів та зважування на вихідних дільниках кожного розряду. Ці дві структури у "чистому" вигляді використовуються порівняно рідко, оскільки їм властиві спільні вади: великий

сумарний опір та діапазон прецизійних резисторів, що використовуються. Зменшення цих величин досягається шляхом застосування багатоланцюгових резистивних дільників.

Графік систематичної похибки структури ЦАП з "інвертованою" матрицею R-2R показаний на рис.9,а. Перевагою таких ЦАП є невелика споживана потужність, практично не залежна від кількості розрядів. До вад структури відносяться великі похибки на початку діапазону U_H та нелінійності $U_{нел}$, а також відносно низька швидкодія, що визначається великою вихідною ємністю та великою затримкою підключення молодших розрядів. Велика кількість переходів база-емітер багатоемітерних транзисторів ДС та труднощі в регулюванні струмів розрядних ДС ускладнюють виготовлення цієї структури у мікроелектронному виконанні.

Графік систематичної похибки структури ЦАП з вихідною матрицею R-2R показаний на рис.9,б. Похибки U_H та $U_{нел}$ малі. Час установлення $U_{вих}$ визначається в основному процесами заряду-розряду C_p і також малий. Відношення часів включення та наростання $U_{вих}$ старших і молодших розрядів не перевищує 3:2, що визначає невеликі комутаційні викиди при зміні кодів. Максимальний час установлення $U_{вих}$ настає при включенні та вимиканні середніх розрядів. Структура має найменші значення сумарного опору і діапазону прецизійних резисторів, а у розрядних ДС використовуються транзистори з одним емітером. Підстроювання $I_{вих}$ розрядних ДС здійснюється досить просто. Велика споживана потужність є основною вадю структури з вихідною матрицею R-2R.

Для зменшення споживаної потужності застосовують комбіновані структури ЦАП, які за всіма показниками займають проміжне становище між основними структурами.

Багаторозрядний АЦП може складатися з одного компаратора, багаторозрядного ЦАП і пристрою керування. Еквівалентна схема АЦП порозрядного врівноваження з компаратором на основі диференційного підсилювача наведена на мал.8,б. На входи ПН подаються напруги U_1 і U_2 , відмінні від $U(t)$ та від $U_{бкн}$. Для розрахунку U_1 і U_2 за відомими значеннями $U_{бкн}$, $U(t)$, $R_{диф}$, $R_{вх.с.}$, $I_{зм}$, R_d , $R_{бкн}$ згідно з методом вузлових потенціалів складена система лінійних рівнянь, а якої U_1 і U_2 визначені аналітично.

$$U_1 = [U(t)/R_d + I_{зм}/2 + R_{диф}G_d(U_{бкн}/R_6 + I_{зм}/2)]/Z ; \quad (24)$$

$$U_2 = [U_{бкн}/R_6 + I_{зм}/2 + R_{диф}G_6(U(t)/R_d + I_{зм}/2)]/Z , \quad (25)$$

де $G_d = 1/R_{диф} + 1/R_{вх.с} + 1/R_d$; $G_6 = 1/R_{диф} + 1/R_{вх.н} + 1/R_6$;
 $Z = R_{диф} \cdot G_d \cdot G_6 - 1/R_6$.

В розробленій імітаційній моделі порозрядного АЦП для кожного такту врівноваження розраховуються U_1 і U_2 , потім враховуються похибки із-за обмежених значень K_U та коефіцієнта подавлення синфазної складової сигналу $K_{п.с}$. Після закінчення циклу врівноваження отриманий код K_1 перераховується в еквівалентну напругу $U_{екв}$ та визначається зведена похибка γ_1 . Програма моделювання порозрядного АЦП з компаратором напруги розраховує похибку 6-розрядного АЦП при подачі на його вхід 256 значень $U_{вх}$ за 12 хв.

При рівних значеннях R_d та $R_{вх.н}$ параметри $I_{ем}$, $R_{диф}$, $R_{вх.с}$ не впливають на похибку АЦП. Графіки похибок АЦП із-за впливу $I_{ем}$ та вхідних синфазних опорів $R_{вх.с}$ наведені на рис.10, а, б. Сума похибок може бути за абсолютним значенням менше будь-якою з них і досягати максимального значення не на кінцях діапазону, як це показано на рис.10, б.

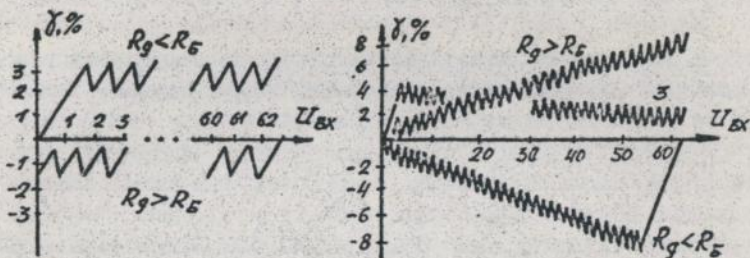


Рис.10. Графіки систематичних похибок АЦП

Структурна схема АЦП з порівнянням струму наведена на рис.11. $R_{вх}$ перетворювач вхідної напруги у струм ПНС, блоку компенсуючих струмів ЕКС, а також $R_{вх}$ обмежувач напруг ОН компаратора струмів гранично велика. Якщо $R_H = \infty$, $E_1 = "1"$, $E_2 = "0"$, то АЦП працює у режимі порівняння струмів і як підсилювач струму ПС використовується емітерний повторювач. У вузлі А за різницею струмів у один квант формуються цифрові рівні "0" або "1". При великому R_H зменшуються похибки, що вносяться дрейфом $U_{см0}$, $R_{диф}$, $R_{вх.с}$ компаратора. При відключенні розрядних ДС для прискорення розряду використовується ДС протилежної полярності ДСП, яке підключається до вузла А на короткий проміжок часу, що скорочує час встановлення різнищевої напруги у 2,3 рази при $\Delta I_{кв} = 50$ мкА, $C_H = 15$ пФ, $R_H = 24$ кОм.

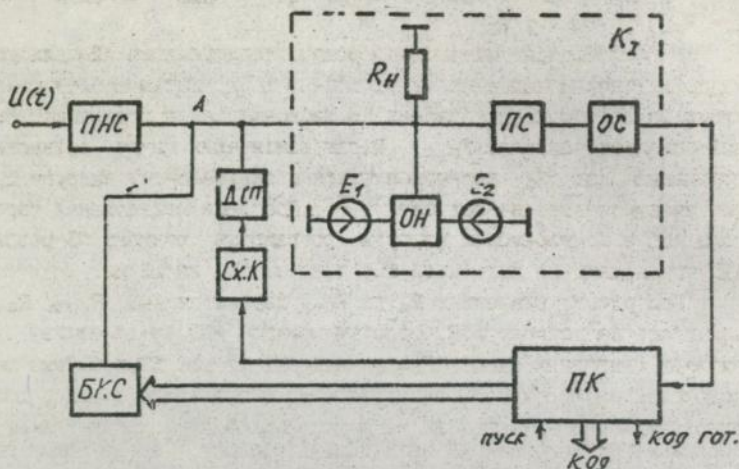


Рис.11. Структурна схема АЦП з порівнянням струмів

Оскільки основні реактивності сучасних компонентів носять емнісний характер, то порівняння малих струмів виконується повільно. Скорочення часу порівняння досягається застосуванням у компараторах як посилення струму, так і посилення напруги, тобто потужності.

У п'ятій главі досліджено вплив розкиду параметрів компонентів на похибки перетворювачів, розроблена технологія виготовлення модульних ЦАП без використання операцій регулювання. Найбільш розповсюджена схема одного розряду ЦАП складається з операційного підсилювача ОП, давача похибок, який містить резистори R_d , $R_{оп}$, транзистори T_d , $T_{к.д.}$ та розрядний ланцюжок, що складається з транзисторів T_i , $T_{кi}$ та резистора R_i . Розкид величин резисторів R_d та R_i , напруг база-емітер $U_{бед}$ і $U_{бєi}$ та коефіцієнтів підсилення за струмом β транзисторів викликає відхилення значень розрядних струмів від розрахункових величин.

Якщо i -е ДС підключено до виходу, то

$$I_i = \left(\frac{U_{оп} - U_{ам}}{R_{оп}} \right) \cdot \frac{R_d}{R_i} - \frac{U_{бед} - U_{бєi}}{R_i} + \frac{2R_d}{R_i} I_{бд} - 2I_{бi}. \quad (26)$$

де $I_{бд}$, $I_{бi}$ - базові струми транзисторів давача похибок; $U_{ам}$ - зведена напруга зміщення нуля ОП.

Із формули (26) отримано вираз для визначення похибки у i -му розряді, яка виникає із-за розкиду параметрів компонентів при пос-

тійній температурі:

$$\delta I_1 = \frac{1}{I_1} \left(\frac{U_{\text{свд}}}{R_1} \delta U_{\text{свд}} - \frac{2I_1}{B_d} \delta B_1 - \left(\frac{U_{\text{оп}} - U_{\text{см}}}{R_{\text{оп}}} R_d + \frac{2R_d I_{\text{св}}}{B_d} \right) \frac{1}{R_1} \delta R_1 \right). \quad (27)$$

З урахуванням того, що струми витікань відключених розрядників ланцюжків малі, похибка $I_{\text{вих}}$ всього ЦАП

$$\delta I_{\text{вих}} = \sum \alpha_i \cdot \delta I_{1i} / 2^i, \quad (28)$$

де $\alpha_i = 0$ або 1, залежно від коду; n - кількість розрядів. З використанням принципу рівних відхилень і урахуванням зменшення допуску на похибку старшого розряду на 20-30%, визначені допуски на δB_1 та $\delta U_{\text{свд}}$ для кожного розряду окремо. При кількісних значеннях вихідних величин, характерних для ЦАП 33, вимоги до розкидів B_1 та $U_{\text{свд}}$ для кожного розряду 10-розрядного ЦАП наведені у табл.2. Наведені в табл.2 допуски визначають вимоги до розкидів параметрів компонентів монолітних ЦАП. Виходячи з табл.2 та значень $\Delta U_{\text{свд}} = 1$ мВ, $\delta B = 0,01$, точність монолітних ЦАП, що виготовляються, може бути забезпечена на рівні 8 розрядів. Розроблена методика використана при проектуванні першого в СРСР монолітного ЦАП типу К594ПА1. Подальше збільшення точності здійснюється за рахунок функційної підгонки резисторів. Однак температурні похибки при

Таблиця 2

Допуски на відхилення параметрів компонентів ЦАП

Номер розряду на δI_1	Допуск $\delta B_1 \cdot 10^2$, %	$\Delta U_{\text{свд}}$, мВ
10	0,04	0,7
9	0,06	1,7
8	0,07	1,9
7	0,09	2,7
6	0,13	4,3
5	0,21	7,5
4	0,37	14
3	0,69	30
2	1,33	53
1	2,61	210

цьому не зменшуються; підгонка виконується відповідно до складних методик з перериванням технологічних циклів; потрібне дороге устаткування. Допуски на розкид параметрів компонентів (табл. 2) визначалися для монолітних ЦАП для найгіршого випадку. У реальних умовах виготовлення гібридних та модульних перетворювачів співвідношення похибок із-за розкидів $U_{\text{свд}}$ та B_1 може бути будь-яким, у тому числі можлива їх взаємна компенсація. Температурні коефіцієнти параметрів B_1 та $U_{\text{свд}}$ одного знака, тому

при зміні температури оточуючого середовища компенсація порушується. Відносні змінення величин B_{it} і $U_{\text{сeit}}$ від температури пов'язані з їх розкидами такими виразами:

$$\delta B_{it} = \delta B_i(TK_{L_i})\Delta T; \quad \delta U_{\text{сeit}} = \delta U_{\text{сei}}(TKU_{\text{сei}})\Delta T, \quad (29)$$

де TKB_i та $TKU_{\text{сei}}$ - температурні коефіцієнти, які відповідно дорівнюють $1 \cdot 10^{-2}/^{\circ}\text{C}$ та $3,3 \cdot 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$; ΔT - змінення температури оточуючого середовища. При нормі температурної похибки в 1 квант на 20°C урахування тільки температурних похибок збільшує при устимий розкид у 5 разів для B_i у 15 разів для $U_{\text{сe}}$ для перетворювачів класу 0,1 - 0,025.

Розроблено алгоритм автоматизації добору комплекту транзисторних матриць для модульного ЦАП, який реалізований у програмі "Комплект". Час добору комплекту та підготовка документа для виготовлення не перевищує 35 м. Із партії у 100 матриць типу К198НТ5В при доборі комплектів для 10-розрядного ЦАП використані всі матриці, для 12-розрядного ЦАП - 90% матриць, для 14-розрядного - 50% матриць.

Запропонована технологія виготовлення модульних та гібридних перетворювачів на основі урахування індивідуальних параметрів компонентів дозволяє виготовляти перетворювачі з малими температурними похибками, високим відсотком використання компонентів та гарантованими параметрами. Технологія застосована для серійного виробництва модуля Ф5286 на Київському ВО "Точелектроприлад".

У шостій главі проаналізовані АЦП як пристрої обробки інформації і запропоновані оригінальні пристрої обробки сигналів на основі АЦП.

Незалежно від методу перетворення кожний АЦП складається з двох-трьох регістрів пам'яті, комбінаційних схем, комутованих або некомутованих джерел аналогових величин та компараторів аналогових сигналів. Обробка інформації у АЦП виконується у цифрових, цифроаналогових, аналого-цифрових та аналогових формах. У АЦП використовуються операції двох нижніх рівнів обробки цифрової інформації, на яких реалізуються функційно повні системи логічних функцій та елементарні операції над словами, а керування здійснюється апаратно.

Цифроаналоговою операцією є комутування аналогових величин, тобто множення їх на цифрові константи "0" та "1". Аналого-цифрова операція представлена порівнянням аналогових сигналів та формуван-

ням цифрових значень "0" або "1" залежно від результатів порівняння. Як аналогові операції використовуються запам'ятовування, інверсія, додавання (віднімання), множення (ділення) на константу. Всі перераховані операції можна співставити з операціями двох нижніх рівнів обробки цифрової інформації.

Розширення функційних можливостей АЦП загального застосування (АЦП 33) вимагає додаткових апаратних витрат, які не повинні перевищувати апаратні витрати стандартної системи обробки сигналів з АЦП та мінімального варіанту ЕОМ, наприклад програмованого мікрокалькулятора.

Універсальність застосування АЦП забезпечена виконанням такої розповсюдженої функції як вимірювання (перетворення) безперервного сигналу, яка виконується шляхом порівняння аналогових сигналів з опорними і запам'ятовуванням результатів порівняння. У цьому ж ряді знаходяться такі функціональні операції як контроль, розпізнавання образів, технічна діагностика.

Таким чином, розширення функційних можливостей АЦП 33 слід вести у напрямку вимірювання - контроль - розпізнавання образів, причому АЦП 33 повинен залишатись у класі пристроїв з апаратним керуванням, обмеженим набором операцій, що виконуються, а оперативна пам'ять не повинна перевищувати декількох регістрів, тобто бути не більшою, ніж у мінімальному варіанті ЕОМ.

До типових задач контролю неперіодичних сигналів відносяться: визначення локальних характеристик сигналу (зростання, убування, екстремуми у точці); перевищення або зниження сигналу над (під) заданим рівнем; слідування за встановленими межами, визначення екстремальних значень на заданому проміжку часу. Дві основні операції контролю - запам'ятовування декількох значень аналогового сигналу та їх порівняння один з одним можуть виконуватись над аналоговою або цифровою формою представлення інформації, як це наведено у табл.3. Згідно з табл.3 усі пристрої контролю поділяються на чотири типи: тільки аналогові $[m_A, c_A]$ та тільки цифрові $[m_D, c_D]$ типи пристроїв, а також аналого-цифрові типи пристроїв $[m_A, c_D]$ та $[m_D, c_A]$. Аналогові запам'ятовуючі пристрої мають погану точність, обумовлену розрядом запам'ятовуючого елемента струмами витікання. Цифрове порівняння потребує відносно великих апаратних витрат.

АЦП є пристроями $[m_D, c_A]$ типу. У роботі основна увага приділена пристроям обробки сигналів типу $[m_D, c_A]$ на основі АЦП з вико-

Таблиця 3

Форма представлення сигналів та операції, які виконуються над ними, в пристроях контролю

Форма представл. сигналів		Операції, які виконуються	
		запам.	порівн.
		m	c
Цифрова	D	m _D	c _D
Аналогова	A	m _A	c _A

ристанням для порівняння компаратора аналогових сигналів, що входить у склад АЦП. Запропоновано ряд нових пристроїв типу [m_D, c_A], деякі з них впроваджені у серійне виробництво. Таким чином, розширення функцій АЦП 33 за рахунок операцій контролю не вимагає великих витрат апаратури та часу і залишає АЦП у класі пристроїв з апаратною обробкою інформації.

У сьомій главі наведені особливості практичної реалізації і подані основні технічні параметри пристроїв перетворення (табл.4), розроблені під керівництвом і за особистою участю автора.

ВИСНОВКИ

Основним науковим результатом дисертаційної роботи є розроблена теорія побудови аналого-цифрових та цифроаналогових перетворювачів загального застосування на різних рівнях їх організації з використанням багатокритеріального підходу.

У межах теорії створені вихідні теоретичні положення, моделі, методики проектування, оцінки, розрахунку і оптимізації параметрів перетворювачів, розроблені алгоритми і програми, отримані експериментальні дані, які дозволили створити нові АЦП та ЦАП з високими технічними характеристиками, що випускаються промисловістю серійно у складі проблемно-орієнтованих комплексів та програмованих контролерів.

Розроблені нові теоретичні положення та науково обґрунтовані технічні рішення, які внесли помітний внесок у науково-технічний прогрес, конкретизуються наступними основними науковими результатами.

1. Вперше виконані моніторингові дослідження АЦП та ЦАП, що випускаються промисловістю індустріально розвинених країн світу, починаючи з 1964 р. і до 1990 р. Проаналізовані основні структури і технології виготовлення перетворювачів. Відомості про ха-

Таблиця 4

Основні технічні параметри розроблених пристроїв

Основні технічні параметри	Типи розроблених пристроїв								
	ПАП ОС	ПАП58	АПЦЗЗ	Ф5286	АПЦ594	ПАП084	АПЦ049	ПАП048	ФМ5005
Кількість вхідних (вих.) каналів	2	3	32	1	1	1	2	4	16(8)
Діапазон вхідних (вих.) величин	-200+ +200 мА	0+1 В	1В; 10В;	±5В	±5В	±5В	±5В	±5В	±5В, ±10В ±20мА, 4+20мА
Кількість вихідних (вих.) дв. розрядів	11	10	10	10	12	12	12	12	12
Основна похибка	0.1	0.1	0.1	0.3	0.03	0.03	0.1	0.05	0.2
Час перетворення, мкс	300	1	10	5	50	5	5	0.5	1.5 мс
Конструкція	Сист. блок	Прилад	Прилад	Модуль КАМАК	Плата друк.	Плата друк.	Плата друк.	Плата друк.	Модуль контролера
Особливості	Двійково-зважені ДС	Вихідна матриця R-2R	Пор. U, вихідна матриця R-2R, MIC	Пор. I, комб. ПАП, K521CA4 пам'ять 256від.	Пор. I, ПАП K594ПА1, K521CA3	ПАП K594ПА1	Пор. I, ПАП K1108ПА1, комп. K521CA4	ПАП K1108ПА1	Пор. I, ПАП K572ПА1, комп. K597CA3, мікро ЕСМ КР1816ВЕ35
Кількість вироблених пристроїв	3	1	53	1055	12	8	32	32	430

рактистику всієї сукупності перетворювачів компактно представлені у вигляді гістограм їх основних системних параметрів, що дозволило визначити тенденції розвитку перетворювальної техніки у кожний даний момент часу. Аналіз гістограм показав, що основні системні параметри взаємозалежні і не є ортогональною системою, тобто перетворювачі з високою швидкістю мають низьку точність і велике енергоспоживання, а перетворювачі з високою точністю мають низьку швидкість і т.ін.

2. З урахуванням взаємозв'язку параметрів розроблена єдина методика кількісної оцінки таких інтегральних характеристик перетворювачів як технічний рівень, якість і ступінь спеціалізації перетворювачів, причому вказані три характеристики визначені відносно всієї чисельності перетворювачів, що випускаються.

3. Запропонована класифікація перетворювачів, що випускаються, по сукупності їх параметрів і визначений клас перетворювачів загального застосування. Перетворювач загального застосування має рівні або близькі нормовані основні параметри. Визначено напрямки розробки перетворювачів загального застосування та конкретні параметри перспективних АЦП загального застосування.

4. Проаналізовані можливості АЦП ЗЗ відносно додаткової обробки інформації і запропоновано розширення можливостей проводити у напрямку "перетворення - контроль - розпізнання сигналу". Виконана класифікація пристроїв контролю сигналів за формою представлення інформації, над якою виконуються операції запам'ятовування і порівняння відліків. Запропоновані оригінальні пристрої контролю сигналів на основі АЦП ЗЗ.

5. Розроблена дворівнева методика проектування перетворювачів на рівні електричних схем, за якої на рівні однорозрядних перетворювачів виконана ідентифікація і оптимізація параметрів їх макромоделей, що дозволило розрахувати значення точності та швидкості різних багаторозрядних структур ЦАП та АЦП і виконати їх порівняльну оцінку.

6. Запропоновані еквівалентні схеми макромоделей однорозрядних ЦАП та АЦП, де як нелінійний елемент використовується ключ із залежністю від напруги або струму затримкою у ланцюзі керування. Визначені функції впливу параметрів компонентів на час наростання вихідного сигналу і виконані кількісні оцінки швидкості макромоделей однорозрядних ЦАП з діодним та транзисторним СК. Показано, що

значний вплив на швидкодію мають режими форсування керуючим сигналом. Отримані співвідношення для розрахунку точності та швидкодії однорозрядних ЦАП та АЦП залежно від режимів роботи компонентів. Виконана оптимізація режимів роботи для одержання максимальних точності та швидкодії.

7. На ЕОМ зроблені розрахунки точності та швидкодії багаторозрядних структур ЦАП та АЦП і виконаний їх порівняльний аналіз. Визначені ділянки діапазону з найбільшими похибками і часом наростання вихідного сигналу основних структур АЦП та ЦАП. Запропонована оригінальна структура АЦП з порівнянням струмів.

8. Отримані співвідношення, що пов'язують розкид параметрів компонентів з диференційною похибкою ЦАП з транзисторним СК. Розроблена технологія безпідстроюваного виготовлення модульних і гібридних ЦАП, за якою вимірюються параметри всіх компонентів, а потім компоненти згідно з своїми параметрами використовуються у визначених місцях конструкції пристрою. Технологія дозволила виключити трудомісткі операції регулювання, знизити температурні похибки, підвищити вихід якісних пристроїв.

9. Розроблений ряд оригінальних АЦП та ЦАП, забезпечених способами перевірки їх параметрів і виготовлюваних серійно на підприємствах України.

Основні положення дисертації опубліковані в таких працях:

1. Вопросы проектирования преобразователей формы информации/А.И.Кондалев, А.Н.Никитин, В.А.Багацкий и др.- Киев: Наук.думка, 1977.- 242 с.

2. Преобразователи формы информации для малых ЭВМ/А.И.Кондалев, В.А.Багацкий, В.А.Романов, В.А.Фабричев.- Киев: Наук.думка, 1982.- 312 с.

3. Высокопроизводительные преобразователи формы информации/А.И.Кондалев, В.А.Багацкий, В.А.Романов, В.А.Фабричев.- Киев: Наук.думка, 1987.- 280 с.

4. Преобразователи формы информации с обработкой данных / В.А.Багацкий, Ю.М.Грешищев, И.В.Самус, В.А.Фабричев.- Киев: Наук.думка, 1992.- 264 с.

5. Багацкий В.А. Современные аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи.- Киев: О-во "Знание", 1980.- 24 с.

6. Багацкий В.А. Методики оценки технического уровня и качества проектирования и производства электронных устройств.- Киев:

О-во "Знание", 1989. - 20 с.

7. Багацкий В.А. Аналого-цифровые преобразователи общего применения с обработкой сигналов. - Киев: О-во "Знание", 1992. - 24 с.

8. Багацкий В.А., Макаров Г.Т. Об одном варианте цифро-аналогового преобразователя для отклонения электронного луча//Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. - Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1968. - №2. - С.88-96.

9. Багацкий В.А. -К анализу быстродействия и точности ЦАП с суммированием токов//Элементы и устройства вычислительных машин. - Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1972. - С.77-86.

10. Багацкий В.А. Выбор оптимальных параметров аналогового блока АЦП//Материалы II Всесоюз.симп. "Проблемы создания преобразователей формы информации". - Киев: Наук.думка, 1973. - С.369-376.

11. Malinowsky B.N., Kondalew A.I., Bagazky W.A., Romanow W.A. Einige Fragen der Ingenieur-Ausarbeitung von Analog-Digital Umsetzern// J. d'Electronique "Conversion A/D and D/A". - Lausanne/Switzerland: Ecole polytechnique federale, 1973. - P.571-575.

12. Багацкий В.А., Романов В.А. Аналоговые узлы и элементы преобразователей формы информации на ИС //Преобразование и передача информации. - Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1973. - С.95-101.

13. Багацкий В.А., Ключан П.С. Исследование временных параметров блока эталонных напряжений быстродействующего АЦП на ИС// Там же. - С.102-111.

14. Кондалев А.И., Багацкий В.А., Романов В.А. Преобразователь формы информации на интегральных схемах//Тр.Всесоюз.семинара "Математическое моделирование на сплошных и дискретных средах". - Киев: Ин-т математики, 1974. - С.325-333.

15. Кондалев А.И., Багацкий В.А., Фабричев В.А. Анализ погрешностей ЦАП с учетом обратных токов ключей и выходных сопротивлений ИТ //УСМ. - 1975. - №4. - С.102-107.

16. Кондалев А.И., Багацкий В.А. Анализ системных параметров зарубежных АЦП и ЦАП // Там же. - 1976. - №1. - С.52-60.

17. Кондалев А.И., Багацкий В.А. О статистическом подходе к построению критериев оценки качества АЦП // Там же. - №2. - С.109-112.

18. Багацкий В.А., Лобас Л.Г., Тепикин В.Е. Влияние параметров входных цепей ИО на систематические погрешности АЦП/Преобразова-

ние и передача информации.- Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1978.- С.44-54.

19. Багацкий В.А. Структуры цифро-аналоговых преобразователей с коммутацией тока //УСим.- 1979.- №5.- С.102-106.

20. Динамические характеристики одноразрядного ЦАП с транзисторным ключом//В.А.Багацкий, Н.Н.Миронец, В.К.Лещев, А.А.Фремке //Преобразователи формы информации и средства передачи данных.- Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1981.- С.32-39.

21. Багацкий В.А., Дудник С.А. Аналого-цифровой преобразователь со сравнением тока //Преобразователи формы информации для микропроцессорных систем.- Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1982.- С.18-23.

22. Багацкий В.А. Методика подбора комплекта транзисторных сборок для быстродействующего ЦАП //Преобразование, передача и обработка информации.- Киев: Ин-т кибернетики им.В.М.Глушкова, 1983.- С.32-36.

23. Аналого-цифровой преобразователь Ф5286/А.И.Кондалев, В.А.Багацкий, А.А.Марчук, Н.Н.Красноруцкая //УСим.- 1984.- №4.- С.125-127.

24. Багацкий В.А. Методика оценки обобщенного качества аналого-цифровых преобразователей// Там же.- 1985.- №6.- С.43-49.

25. Багацкий В.А., Самус И.В. Алгоритм и программа автоматизированного подбора комплекта транзисторных сборок для ЦАП //Моделирование и разработка интегральных структур микрозлектронных устройств.- Киев: Ин-т кибернетики им.В.М.Глушкова, 1986.- С.23-29.

26. Багацкий В.А. Аналого-цифровые преобразователи общего применения //УСим.- 1988.- №2.- С.9-11.

27. Багацкий В.А. Сравнительный анализ структур ЦАП по быстродействию //Технические средства обработки информации для высокопроизводительных ЭВМ и систем.- Киев: Ин-т кибернетики им.В.М.Глушкова, 1988.- С.8-11.

28. Багацкий В.А. Аналого-цифровые преобразователи общего применения с обработкой сигналов //УСим.- 1992.- №3/4.- С.34-41.

29. А.с. 545078 СССР, М.Кл.2 Н03К 13/17. Аналого-цифровое устройство для определения параметров спектральных кривых/Р.А.Романов, В.А.Багацкий.- Оpubл. 24.07.77, Бюл.№4.

30. А.с. 634306 СССР, М.Кл.2 G06G 7/52. Устройство для определения параметров симметричных спектральных кривых/В.А.Багацкий.

- Оpubл. 28.11.78, Бюл.№43.

31. А.с. 869023 СССР, М.Кл.З НОЗК 13/17. Аналого-цифровой преобразователь /В.А.Багацкий.- Оpubл. 30.09.81, Бюл.№36.

32. А.с. 1048573 ССР, М.Кл.З НОЗК 13/17. Аналого-цифровой преобразователь /В.А.Багацкий.- Оpubл. 15.10.83, Бюл.№38.

33. А.с. 972949 СССР, М.Кл.З G05B 13/02. Устройство для поиска экстремумов сигнала /В.А.Багацкий.- Оpubл. 15.06.89, Бюл.№22.

34. А.с. 557718 СССР, М.Кл.2 НОЗК 13/20. Цифровой указатель экстремумов сигнала /В.А.Багацкий.- Оpubл. 30.06.89, Бюл.№24.

35. Багацкий В.А., Брайко Ю.А., Тышковская Л.Л. Регулировка и проверка линейности ЦАП и АЦП с использованием ЭЕМ "Электроника-60М"//Тос.фонд алгоритмов и программ НПО08081 от 31.10.84.

36. Принципы организации проблемно-ориентированных комплексов для автоматизации производственно-технологических процессов /В.А.Багацкий, Ю.А.Брайко, Р.Г.Имамутдинова и др.- Киев, 1993.-33 с. - (Препр./АН Украины. Ин-т кибернетики им.В.М.Глушкова; 93-36).

37. Багацкий В.А. Оценка погрешностей ЦАП с коммутацией тока //Тез. докл. IV Всесоюз. симп. "Проблемы создания преобразователей формы информации".- Киев: Наук.думка, 1980.-Ч.2.-С.126-131.

38. Багацкий В.А. Бесподстроечная технология изготовления ПЛИ общего применения //Тез.докл.VI Всесоюз.симп. "Проблемы создания преобразователей формы информации".- Киев: Ин-т кибернетики им.В.М.Глушкова, 1988.- С.199-200.

39. Багацкий В.А., Марчук А.А. Аналого-цифровые преобразователи в измерительно-вычислительных комплексах //Тез.докл.конф. "Методы и микроэлектронные средства цифрового преобразования и обработки сигналов".- Рига: Ин-т электроники и ВТ, 1989.- С.7-9.

40. Багацкий В.А., Самус И.В., Коновальский В.И. Модули ввода-вывода непрерывных сигналов программируемого контроллера //Тез. докл.респ.конф. "Вопросы проектирования и практического использования преобразователей формы информации".- Киев: Ин-т кибернетики им.В.М.Глушкова, 1990.- С.12-14.

41. Багацкий В.А. Методика оценки технического уровня, качества проектирования и производства устройств АСУ ТП // Тез.докл. Всесоюз.конф. "Проблемы оценки научно-технического уровня, качества и эффективности АСУ".- М.:ВНИИ информ.и экономики, 1990.-С.13-14.

42. Багацкий В.А., Самус И.В., Красноручная Н.Н. АРМ настройки и проверки модулей ввода и вывода непрерывных сигналов //Тез.докл.7 симп. "Проблемы создания преобразователей формы информации".- Киев: Ин-т кибернетики им.В.М.Глушкова, 1992.- С.118-119.

Глуш

Багацкий В. А. Теория построения, проектирование и практическая реализация аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей общего применения.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.08 — вычислительные машины, системы и сети, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, Институт кибернетики им. В. М. Глушкова НАН Украины, Киев, 1995.

Защищается 56 научных работ и 8 авторских свидетельств, которые содержат теоретические исследования современных преобразователей на различных уровнях их организации с использованием многокритериального подхода. Разработана методика количественной оценки таких интегральных характеристик преобразователей, как технический уровень, качество и степень специализации. Предложена двухуровневая методика проектирования преобразователей на уровне электрических схем. Несколько моделей преобразователей общего применения внедрены и серийно выпускаются.

Bagatsky V. A. The Theory of Designing, Projection and Practical Realization ADC and DAC of General Purpose.

Thesis is submitted to earn the Doctors degree of Engineering Science in speciality — 05.13.08 — Computers, systems and nets, elements and devices of computers technics and systems control, Victor M. Glushcova Institute of Cybernetics, National Ukraine Academy of Sciences, Kiev, 1995.

There are submitted to defence 56 scientific works and 8 autor's invention certifications, that contains theoretical reseach of converters on different levels of its organization with using multicriterial approach. The method of quantitative estimation such integrate characteristics as technical level, quality and level of specialization was designed. Two level's method of converter's progection was offered on the level of electrical schemes. Several general purpose converters models were installed in serial production.

Ключові слова: аналого-цифровий та цифроаналоговий перетворювач, проектування, технологія виготовлення.

Підп. до друку 11.06.95. Формат 60×84/16. Папір офс. Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,86. Ум. фарбо-відб. 2,09. Обл.-вид. арк. 2,0. Тираж 100 прим. Зам. 576.

Редакційно-видавничий відділ з поліграфічною дільницею
Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України
252022 Київ 22, проспект Академіка Глушкова, 40

284491

AB 32.897

AB 32.897