

Академія наук України
Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова

На правах рукопису

РОМАНОВ Володимир Олександрович

УДК 681.325.3

ТЕОРІЯ, МЕТОДИ ПОБУДОВИ ТА ТЕХНІЧНА
РЕАЛІЗАЦІЯ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ФОРМИ ІНФОРМАЦІЇ
З ПІДВИЩЕНОЮ НАДІЙНІСТЮ ТА ПРОДУКТИВНІСТЮ

05.13.05 — елементи та пристрої обчислювальної техніки
та систем керування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ 1993



00778895 (1)

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інститут
кова АН України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ЄГИПҚО В. М.,
доктор технічних наук, професор
СТАХОВ О. П.,
доктор технічних наук
ЛАПІЙ В. Ю.

Провідна установа: Виробниче об'єднання «Київський радіо-
завод».

Захист відбудеться «10» лютого 1994 р. о 14.00
год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 016.45.02
при Інституті кібернетики імені В. М. Глушкова АН України
за адресою:

252207 Київ 207, проспект Академіка Глушкова, 40.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічному
архіві інституту.

Автореферат розісланий «6» січня 1994 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Гуменюк-Сичевський В. І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРАЦІ

Актуальність проблеми. Перетворювачі форми інформації /ПФІ/ - це пристрої обчислювальної техніки, які використовуються сумісно з ЕОМ в автоматизованих системах керування технологічними процесами, системах автоматизації наукових експериментів, системах збору та обробки даних у реальному масштабі часу, системах контролю та ін.

До класу мікропроцесорних ПФІ належать перетворювачі, які поряд з аналого-цифровими та цифро-аналоговими перетворюваннями виконують операції по обробці даних, мають інтерфейсні функції, функції керування та контролю, включають в себе мікропроцесори та мікроЕОМ.

Від рівня технічних та метрологічних характеристик мікропроцесорних ПФІ залежать якість та надійність керування і контролю, швидкість і точність обробки даних, а звідси - надійність та продуктивність сучасних обчислювальних і керуючих систем у цілому.

Мікропроцесорні ПФІ, як базові засоби електронізації, повинні мати високу відмовостійкість та живучість у важких умовах експлуатації, мати середнє напруження на відмову не менш як 50 тисяч годин.

Усе це обумовлює необхідність подальших досліджень в області розробки нових принципів та методів удосконалення характеристик ПФІ, створення перетворювачів з високою точністю, надійністю та продуктивністю.

Великий вклад в теорію та практику побудови різних класів ПФІ внесли такі вчені, як Е.І.Гітис, А.І.Кондалев, П.П.Орнатський, Г.М.Петров, В.Б.Смолов, О.П.Стахов, Ф.Є.Темніков, Ю.М.Туз, Е.П.Угримов, В.М.Хлістунсов, М.П.Цаленко, Б.І.Швецький, В.М.Шляндін, та ін. Зусиллями багатьох з них створені авторитетні наукові школи та колективи спеціалістів.

На основі досягнень ведучих вітчизняних та зарубіжних вчених і спеціалістів розвивається теорія перетворювачів форми інформації нового покоління - мікропроцесорних ПФІ. На цей час теорія мікропроцесорних ПФІ знаходиться у стадії становлення. У ряді праць досліджені мікропроцесорні ПФІ, які орієнтовані на рішення конкретних задач у конкретних системах. Однак у цих працях та у працях інших авторів відсутній системний підхід до аналізу та оптимізації ПФІ, систе-

матизація і узагальнення методів підвищення точності, надійності та продуктивності мікропроцесорних ПФІ. Не розроблені узагальнені критерії оцінки показників якості таких перетворювачів.

Самостійною проблемою є розробка метрологічного забезпечення мікропроцесорних ПФІ, включаючи методи та засоби вимірювання, контролю і діагностики параметрів ПФІ як у процесі виробництва, так і у процесі системного застосування.

Традиційні методи проектування ПФІ, що ґрунтуються на використанні мікроелектронної елементної бази країн СНД та ближнього зарубіжжя, не дозволяють створювати ПФІ з точністю більш як 12 двійкових розрядів, швидкодія яких становить 10^6 перетворень за секунду. З підвищенням швидкодії до $10^7 - 10^8$ перетворень за секунду точність ПФІ знижується до 10 - 8 двійкових розрядів. Надійність сучасних мікроелектронних ПФІ дорівнює не більш як $2 \cdot 10^4$ годин напруження на відмову. Звідси випливає, що перетворювачі, які випускає промисловість країн СНД та ближнього зарубіжжя, не придатні для створення надійних систем контролю, керування та обробки даних з високою точністю та продуктивністю.

Аналіз досвіду, який накопичено в області створення системних перетворювачів форми інформації, вивчення впливу сучасних тенденцій в розвитку засобів обчислювальної техніки, ЕОМ і систем на параметри та характеристики ПФІ, дозволяють сформулювати основні проблеми в області теорії і проектування перетворювачів форми інформації нових поколінь.

В області теорії:

- розвиток архітектурно-функціональної концепції ПФІ;
- розробка методів аналізу, синтезу і оптимізації ПФІ;
- розробка методів підвищення точності, надійності і продуктивності ПФІ;
- розробка методів вимірювання, контролю і діагностики параметрів ПФІ.

В області проектування:

- підвищення швидкодії ПФІ до 10^8 перетворень за секунду /без зниження показників точності та надійності/;
- підвищення точності ПФІ до 18 двійкових розрядів /без істотного зниження швидкодії ПФІ/;
- підвищення відмовостійкості і живучості ПФІ до 50 тисяч годин напруження на відмову;

- поєднання в ПФІ операцій по перетворенню та обробці сигналів,
- розробка засобів вимірювання, контролю та діагностики параметрів ПФІ / у тому числі засобів умонтованої діагностики та контролю/;
- створення ПФІ у вигляді великих гібридних інтегральних схем /ВГІС/ та гібридних інтегральних функціональних пристроїв /ГІФП/.

Мета праці та задачі досліджень. Метою досліджень є розвиток теорії перетворювачів форми інформації для класу мікропроцесорних ПФІ, розробка методів підвищення точності, надійності і продуктивності мікропроцесорних ПФІ та їх компонентів, створення на цій основі нових ПФІ з підвищеною точністю, надійністю та продуктивністю.

Для досягнення цієї мети сформульовані та вирішені такі задачі:

- аналіз, синтез і оптимізація мікропроцесорних ПФІ за критеріями точності, надійності та продуктивності;
- розробка структурних, технологічних і схематичних методів підвищення точності і продуктивності мікропроцесорних ПФІ, їх елементів та вузлів;
- розробка методів підвищення апаратної, метрологічної та програмної надійності мікропроцесорних ПФІ;
- розробка методів та засобів контролю і діагностики параметрів мікропроцесорних ПФІ, включаючи засоби умонтованого контролю та діагностики;
- створення модульних наборів мікропроцесорних ПФІ на основі тонкоплівкової, товстоплівкової технології, технології друкованих плат і гібридних інтегральних функціональних пристроїв.

Методи дослідження базуються на апараті теорії імовірностей, теорії випадкових функцій, теорії інформації, теорії точності вимірювальних систем, теорії оптимального керування. Методами експериментальної перевірки результатів роботи є математичне моделювання на ЕОМ та фізичне моделювання на діючих зразках та промислових партіях ПФІ.

Нові наукові результати. На основі теоретичного узагальнення досліджень в області проектування системних перетворювачів форми інформації розвинута теорія мікропроцесорних ПФІ, що включає в себе методи аналізу, синтезу і оптимізації структури та параметрів перетворювачів даного класу, розроблені методи підвищення точності,

продуктивності та надійності мікропроцесорних ПФІ і їх компонентів.

Практична цінність. Сукупність отриманих теоретичних результатів та наукових положень доведена до інженерних методик проектування мікропроцесорних ПФІ з покращеними технічними та метрологічними характеристиками.

Розроблені структури мікропроцесорних ПФІ підвищеної точності, надійності та продуктивності.

Розроблені основні функціональні вузли і елементи мікропроцесорних ПФІ: аналого-цифрові і цифро-аналогові перетворювачі / у тому числі АЦП і ЦАП з цифровою корекцією похибок/, масштабуючі і функціональні підсилювачі, підсилювачі з програмованим коефіцієнтом передачі, підсилювачі виборки та запам'ятовування /у тому числі УВЗ, що адаптуються до швидкості зміни вхідного сигналу/, компаратори, аналогові ключі і комутатори.

Створене системне, прикладне та тестове програмне забезпечення для мікропроцесорних ПФІ у складі персональних професійних ЕОМ.

Розроблені технічні та програмні засоби метрологічної атестації, контролю і діагностики мікропроцесорних ПФІ і їх компонентів.

Реалізація і впровадження результатів роботи. Дослідження здійснювались згідно з завданнями ДКНТ колишнього Союзу і проектами ДКНТ України, завданнями Президії АН України, науково-технічних програм і господарчих договорів, у яких автор брав участь як відповідальний виконавець або як науковий керівник.

За результатами виконаних завдань перелічених відомств створені та впроваджені у народне господарство мікропроцесорні ПФІ для професійних персональних ЕОМ, для систем цифрового магнітного запису і систем автоматизації наукового експерименту, для систем контролю та вимірювання параметрів РЕА. На базі мікропроцесорних ПФІ та ПЕОМ створені вимірювальні станції для систем керування складними технологічними процесами і систем екологічного моніторингу.

Розроблені та впроваджені ПФІ виконані у вигляді автономних пристроїв і умонтованих модулів на друкованих платах, у вигляді наборів гібридних ВІС на основі тонкоплівкової і товстоплівкової технології та у вигляді гібридних інтегральних функціональних пристроїв.

Основні положення дисертації, що виносяться на захист.

І. Методи і алгоритми аналізу і оптимізації мікропроцесорних ПФІ за критеріями точності, надійності і продуктивності.

2. Схемотехнічні та технологічні методи підвищення точності, продуктивності і надійності мікропроцесорних ПФІ та їх елементів і вузлів.

3. Постановка і рішення задачі оптимального резервування мікропроцесорних ПФІ з глибиною резервування до рівня компонентів гібридних ВІС.

4. Оцінка функціональної продуктивності і аналіз похибок мікропроцесорних ПФІ, що орієнтовані на визначення параметрів спектральних кривих, обчислення взаємної кореляційної функції, відношення функцій довільної форми.

5. Методи контролю та вимірювання параметрів мікропроцесорних ПФІ на етапах проектування, виробництва і експлуатації.

6. Принципи побудови і технічна реалізація систем перевірки, діагностики та випробувань мікропроцесорних ПФІ в умовах виробництва і експлуатації.

Апробація одержаних результатів. Наукові та практичні результати роботи доповідались та обговорювались на 2 - 7 симпозиумах "Проблеми створення перетворювачів форми інформації"/Київ, 1973, 1976, 1980, 1984, 1988, 1992 рр./, Всесоюзному семінарі "Математичне моделювання на безперервному середовищі"/Київ, 1974 р./, Міжнародній конференції "Електроніка у вимірюваннях"/Париж, 1975 р./, У-му Всесоюзному симпозиумі з модульних інформаційно-обчислювальних систем /Кишинів, 1985р./, науково-технічній конференції "Перспективи розвитку і використання швидкодіючих перетворювачів форми інформації" /Вільнюс, 1985 р./, Республіканській конференції "Системи контролю параметрів електронних пристроїв і приладів"/Яремча, 1990 р./ та інших міжнародних, республіканських і відомчих семінарах та конференціях.

Публікації. Результати дисертації викладено у 95 наукових працях, в тому числі у 3 монографіях, одному довіднику і 6 брошурах. Отримано 14 авторських свідоцтв на винаходи, 29 наукових праць опубліковано без співавторів.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, шести глав, висновку, списку літератури із 268 найменувань та додатку. Основні матеріали роботи викладені на 327 сторінках, включаючи 29 таблиць та 63 рисунки. Додаток містить основні технічні характеристики і схемні рішення мікропроцесорних ПФІ та їх компонентів, у розробці яких безпосередньо брав участь автор, а також відомості про впровадження та використання основних результатів роботи.

ЗМІСТ ПРАЦІ

У вступі обгрунтована актуальність, сформульована мета, наукова новизна, практична важливість дисертації та основні положення, що захищаються, коротко викладено зміст роботи.

У першій главі розглянуті особливості структурної організації нового покоління перетворювачів форми інформації – мікропроцесорних ПФІ. В основу структурної організації мікропроцесорних ПФІ покладений магістрально-модульний принцип, згідно з яким структура ПФІ може бути паралельною, послідовною або комбінованою. Вибір тієї чи іншої структури залежить від вимог до точності, надійності та продуктивності ПФІ.

Точність – характеристика якості мікропроцесорного ПФІ, що відображує наближеність його похибки до нуля. Проблема підвищення точності ПФІ може бути сформульована як задача оптимізації

$$U^* = \operatorname{argmin}_{U \in \mathcal{U}} \Delta(U), \quad /1/$$

де Δ – похибка мікропроцесорного ПФІ; \mathcal{U} – множина припустимих керувань; U^* – оптимальне керування, що забезпечує мінімальну похибку при наявності різних впливових факторів.

Для розв'язання цієї проблеми необхідно здійснити вибір критерія точності Δ_{\min} , вирішити задачу аналіза і задачу синтеза.

Для вирішення задачі аналіза мікропроцесорного ПФІ необхідно перш за все розглянути три види моделей: моделі сигналів / процесів / на вході ПФІ, моделі ПФІ та моделі похибок ПФІ.

В роботі запропоновані такі обмеження при розв'язанні задачі аналіза:

1. Мікропроцесорний ПФІ розглядається як наперед задана детермінована система.
2. Структура мікропроцесорного ПФІ не змінюється у процесі перетворення та обробки конкретних сигналів.
3. Імовірнісні характеристики мікропроцесорного ПФІ інваріантні до часового зсуву аргумента на довільну величину τ .
4. Досліджуваний процес або сигнал має детермінований характер.
5. Неконтрольовані впливові фактори мають випадковий характер. Модель сигналу /процеса/ у загальному випадку визначається як

$$M_{np} = \{x(t, \omega) : t \in T, x \in X, \omega \in \Omega\}; \quad /2/$$

а модель мікропроцесорного ПФІ визначається як

$$M_{\text{проз}} = \{x(t), y(t); x(t), y(t), y \in M_{\text{проз}}\}, \quad 13/$$

де ω — елементарна випадкова подія; Ω — простір елементарних подій ω .

Детермінова модель мікропроцесорного ПФІ набуває вигляду

$$y(t) = Ax(t) = A_1 \dots A_i x(t), \quad 14/$$

де A — узагальнений оператор ПФІ; A_i ($i = \overline{1, l}$) — елементарні оператори /у детермінованій моделі оператори теж детерміновані/.

В основу аналізу точності мікропроцесорних ПФІ, вибору критерія точності покладено концепцію ідеального і реального мікропроцесорного ПФІ/ що запропонована В.Я.Розенбергом для аналізу точності вимірювальних систем/, причому аналіз полягає у порівняльному дослідженні процесів перетворення у моделях ідеального та реального ПФІ.

Ідеальна модель мікропроцесорного ПФІ набуває вигляду

$$(x, y): y = A_{ig} x; x, y \in M, \quad 15/$$

де x — досліджуваний сигнал / процес /; y — результат перетворення; A_{ig} — оператор ідеального ПФІ; M — область припустимих значень x, y .

Для аналізу точності мікропроцесорного ПФІ використано поняття метричного простору. За допомогою цього поняття найбільш повно може бути описана операція порівняння — одна з основних операцій, яка характеризує точність ПФІ.

Реальний перетворювач на відміну від ідеального зазнає неконтрольованих збурень, що мають, як правило, імовірнісну природу. У зв'язку з цим модель реального мікропроцесорного ПФІ має імовірнісний характер і може бути визначена як

$$(x, y_p): y_p = A_p(u, c, z, t)x, \quad 16/$$

$u \in U; x \in X; c \in C; z \in Z; t \in T; p(u, c, z, t)$,
де $z(t)$ — дія зовнішніх впливових факторів; $c(t)$ — відхилення параметрів ПФІ від номінальних; $p(u, c, z, t)$ — розподіл імовірностей впливових факторів.

Якщо зафіксувати дію імовірнісних механізмів на час конкретного перетворення, похибка мікропроцесорного ПФІ може бути визначена за допомогою метрики ρ , тобто $\Delta = \rho(y_{ig}, y_p)$. Відстань між y_{ig} та y_p і є похибкою ПФІ. З урахуванням дії випадкових впливових факторів похибка мікропроцесорного ПФІ набуває вигляду

$$\Delta = \rho(y_{ig}, y_p) = \rho(\omega), \quad \omega \in \Omega. \quad 17/$$

Якщо на Ω задана імовірнісна міра, то Δ збігається з математичним сподіванням, тобто $\Delta = M\{\rho(\omega)\}$, і являє собою середнє на множені перетворювань значення похибок. Якщо Ω є обмежена множина, імовірнісна міра якої невідома, то Δ збігається з верхньою границю множини, тобто $\Delta = \sup \rho(\omega)$, і являє собою найбільшу з можливих значень похибки за результатами множини перетворювань.

Отримавши вирази для оцінки похибки мікропроцесорного ПФІ з урахуванням та без урахування імовірнісних механізмів впливових факторів, необхідно здійснити аналіз цієї похибки з метою вияву окладових, що вносять найбільший вклад у похибку ПФІ. Для цього запропоновано розглянути мікропроцесорний ПФІ як пристрій, що вміщує оператори $A_{pi}(\omega_i, w_i, t_i)$. Ці оператори являють собою результат керування ω_i та результат неконтролюємих збурень w_i у момент t_i . Звідси похибка Δ_i -го функціонального вузла набуває вигляду

$$\Delta_i = \rho[y_{ig}, y_i(\omega_i, w_i)] = \rho[A_{ig}x, A_i(\omega_i, w_i)x], \quad i=1, n. \quad /8/$$

Якщо відомі похибки окремих функціональних вузлів ПФІ, то можна визначити похибку ПФІ в цілому як відстань між випадковими процесами. На основі аксіоми трикутника маємо

$$\Delta \leq \sum_{i=1}^n \Delta_i. \quad /9/$$

Тобто похибка ПФІ не перевищує суми її елементарних складових.

Для оптимізації мікропроцесорного ПФІ за критерієм точності необхідно, щоб була задана структура ПФІ та вимоги експлуатації у вигляді розподілу $\rho(x)$ впливових факторів $x(t)$. З урахуванням імовірнісного характеру впливових факторів можна сформулювати критерій точності у вигляді заданої імовірності

$$P\{\Delta[A_{ig}x, A_p[C(t, x)x] > \delta, t \in (0, T)\} \leq \varepsilon, \quad /10/$$

тобто P - це імовірність забезпечення похибки ПФІ $\Delta \leq \delta$; ε - мала наперед задана величина.

Звідси задачу оптимізації можна представити у вигляді

$$\omega_{opt} = \underset{\omega \in \Omega}{\operatorname{argmin}} [A_{ig}x, A_p(\omega, w, t)x]. \quad /11/$$

Вираз /11/ можна доповнити обмеженнями

$$f(\omega) \leq m; \quad f(\omega) \leq c, \quad /12/$$

що характеризують масогабаритні показники m , витрати c та інші показники якості ПФІ.

За результатами досліджень запропоновано такий алгоритм аналізу точності мікропроцесорних ПФІ:

- на першому етапі необхідно визначити модель вхідного процесу /сигналу/ і модель ПФІ;

- модель похибки мікропроцесорного ПФІ визначають на другому етапі шляхом порівняння результатів перетворювання у моделях ідеального та реального ПФІ;

- за результатами порівняння на третьому етапі отримують структурну модель похибки, що дозволяє визначити найбільш суттєві складові похибки ПФІ;

- після визначення найбільш суттєвих складових за обраним критерієм точності оптимізують структуру мікропроцесорного ПФІ або окремих його функціональних вузлів, що вносять найбільший вклад у похибку ПФІ.

Такий підхід до оптимізації мікропроцесорних ПФІ за критерієм точності було застосовано при розробці та створенні високоточних перетворювачів АЦП-34, АЦП-34М, та АЦП-36 /клас точності останнього дорівнює 0,006/0,003/.

Використовуючи подібний підхід, можна вирішити задачу синтезу ПФІ. Для цього необхідно задати модель припустимої похибки ПФІ, включаючи моделі складових похибки, задати модель ідеального ПФІ та, застосувавши критерій точності, отримати модель реального ПФІ з заданими вимогами до точності.

Для аналізу, оцінки і оптимізації мікропроцесорних ПФІ за критеріями надійності збережено той же підхід, який було запропоновано для аналізу точності мікропроцесорних ПФІ. Під оптимізацією структури ПФІ розуміємо вибір для кожного із n структурних елементів ПФІ оптимальної схеми із заданого числа подібних за призначенням схем; вибір для кожного типу схем оптимальних параметрів компонентів та теплових режимів. При формулюванні та розв'язанні задачі оптимізації за критерієм надійності необхідно визначити початкові умови, причому для розв'язання у цілому задачі оптимізації досить спочатку розглянути задачу оптимізації i -го структурного елемента при заданому комплексі впливових факторів та заданих вхідних сигналах. Порівняльна оцінка за результатами оптимізації подібних за призначенням структурних елементів ПФІ дає змогу вибрати найбільш надійний структурний елемент.

Задача оптимізації формується таким чином. Задана модель структурного елемента ПФІ, яка описана системою нелінійних рівнянь,

що зв'язують вихідні параметри структурного елемента y_i з параметрами його компонентів Π_i , тепловими режимами Q_j та вхідними сигналами $x(t)$:

$$\begin{cases} y_i(\Pi_i, Q_i, y) = \Phi_i(\Pi_1, \dots, \Pi_N; Q_1, \dots, Q_n, x_1), \\ y_k(\Pi_k, Q_k, y) = \Phi_k(\Pi_1, \dots, \Pi_N; Q_1, \dots, Q_n, x_1, \dots, x_p), \end{cases} \quad /13/$$

з обмеженнями на вихідні параметри структурного елемента ПФІ

$$\begin{cases} y_i' \leq y_i \leq y_i'', \\ y_k' \leq \dot{y}_k \leq y_k'', \end{cases} \quad /14/$$

на параметри компонентів структурного елемента ПФІ

$$\begin{cases} \Pi_i' \leq \Pi_i \leq \Pi_i'', \\ \Pi_N' \leq \dot{\Pi}_N \leq \Pi_N'', \end{cases} \quad /15/$$

і на теплові режими

$$\begin{cases} Q_i' \leq Q_i \leq Q_i'', \\ Q_n' \leq \dot{Q}_n \leq Q_n''. \end{cases} \quad /16/$$

Потрібно визначити припустимі Π і Q , щоб

$$P(t) = \sup P_{\Sigma}(t) \quad /17/$$

за умовами $\sum_i^N m_i \leq m_0$; $\sum_j^N c_j \leq c_0$,

де $P(t)$ - імовірність безвідмовної роботи елемента ПФІ протягом часу t ; m_i - масогабаритні показники i -го компонента

структурного елемента ПФІ; m_0 - задані масогабаритні показники структурного елемента ПФІ; c_j - вартість j -го компонента; c_0 - задана вартість усіх компонентів структурного елемента ПФІ.

Сформульована задача розв'язується методом поетапної оптимізації: на першому етапі здійснюється пошук оптимальних режимів роботи, на другому етапі визначаються оптимальні параметри елементів.

З метою спрощення задачі оптимізації припустимо, що структурний елемент мікропроцесорного ПФІ характеризується одним вихідним параметром та має постійне теплове поле для всіх ВІС та дискретних компонентів. Тоді /13/ можна записати так:

$$y_i(\Pi, Q) = \Phi(\Pi_1, \dots, \Pi_N; Q). \quad /18/$$

Задамо обмеження на параметри компонентів та теплові режими, тобто

$$y_i' \leq y_i(\Pi, Q) \leq y_i'', \quad /19/$$

$$\begin{cases} \Pi_i' \leq \Pi_i \leq \Pi_i'', \\ \Pi_N' \leq \Pi_N \leq \Pi_N'', \end{cases} \quad /20/$$

$$Q_i' \leq Q \leq Q_i''. \quad /21/$$

Використовуючи обмеження /19/-/21/, можна отримати сім'ю кривих вихідного параметра структурного елемента ПФІ у координатах $[Q, \Pi]$, знайти область робочих значень, що дають змогу розв'язати задану систему рівнянь. Аналіз робочої області дозволяє встановити зв'язок між Q і Π , що не приводять до відмови досліджуваного структурного елемента ПФІ. Шляхом розрахунків чи за допомогою випробувань досліджуваного структурного елемента ПФІ встановлюють область припустимих параметрів компонентів Π та теплових режимів Q при фіксованих значеннях решти параметрів компонентів структурного елемента ПФІ. Наступна задача /після визначення робочої області/ полягає в оптимізації фіксованих раніше параметрів за окремими критеріями, тобто необхідно знайти параметри елементів, що забезпечують виконання умови

$$\sup R_2(t) \Big| \sum_i^N m_i \leq m_0. \quad /22/$$

Докладно алгоритми оптимізації мікропроцесорних ПФІ за критеріями надійності розглянуті у дисертації. Внаслідок розв'язання сформульованої задачі можна знайти оптимальні значення параметрів компонентів як з точки зору безвідмовності і мінімальних масогабаритних показників, так і з точки зору оптимальних теплових режимів та вихідних параметрів структурного елемента ПФІ.

Наведений підхід до оптимізації мікропроцесорних ПФІ за критеріями надійності застосований при створенні мікропроцесорного набору ВГІС підвищеної надійності /середнє напрацювання на відмову типової ВГІС становить 50 тисяч годин/.

Найбільш загальною характеристикою продуктивності мікропроцесорного ПФІ є інформаційна продуктивність. Для визначення інформаційної продуктивності необхідно знати імовірнісні характеристики вхідного процесу та похибки ПФІ. На практиці, як правило, інформація про це відсутня, тому для визначення продуктивності ПФІ обмежуються її верхньою та нижньою оцінками. Таким чином, оптимізація мікропроцесорного ПФІ за критерієм продуктивності не виходить за межі розрахунків пропускнуої здатності досліджуваних ПФІ. Критерій продуктивності ПФІ на основі максимізації пропускнуої здатності ПФІ та його компонентів дає змогу отримати вельми слабку порівняльну оцінку досліджуваних перетворювачів, причому такі складові цієї оцінки, як пропускну здатність УВЗ або масштабуючого підсилювача, мають умовний характер. Деяка умовність такого критерію оцінки якості ПФІ заважає його використанню на практиці. Критерій продуктивності повинен враховувати перш за все ті фактори, що підлягають

керуванню з боку розробника. Тоді за допомогою подібного критерію виникає можливість оптимізувати параметри ПФІ на етапі проектування. На основі таких міркувань запропоновано використовувати не продуктивний критерій / до якого належить пропускна здатність/, а реактивний критерій оптимізації продуктивності мікропроцесорного ПФІ. Таким показником є час реакції ПФІ, тобто час між подачею на його вхід сигналу та появою на його виході даних. Реактивний критерій набуває вигляду

$$t_{opt}^* = \underset{u \in U}{\operatorname{argmin}} t(u) \quad /23/$$

при умові, що

$$\sum_i \Delta_i \leq \Delta_0, \quad /24/$$

де t - час перетворювання ПФІ; Δ_i - похибка i -го структурного елемента ПФІ; Δ_0 - задана похибка ПФІ.

Умови обмеження /24/ можна доповнювати вимогами до надійності, вартості, масогабаритних показників тощо.

Запропонований показник продуктивності ПФІ призначений для оцінки якості апаратурних засобів. В зв'язку з тим, що мікропроцесорні ПФІ є програмованими пристроями, у дисертації наведено оцінку продуктивності програмного забезпечення ПФІ.

У другій главі наведена класифікація та дана загальна характеристика методів підвищення точності мікропроцесорних ПФІ. Розглянуто особливості структурних, технологічних та схемотехнічних методів підвищення точності перетворювачів. Показано, що у разі вибору того чи іншого методу підвищення точності мікропроцесорного ПФІ належить враховувати не тільки вимоги до метрологічних характеристик ПФІ, але і вимоги до надійності, продуктивності, вартості, масогабаритних показників умов експлуатації тощо. Виходячи з цього схемотехнічні методи залишаються основними при досягненні максимальних за точністю характеристик мікропроцесорних ПФІ. У дисертації докладно проаналізовані схемотехнічні методи підвищення точності основних функціональних вузлів та елементів мікропроцесорних ПФІ: масштабуючих, програмованих, функціональних підсилювачів, УВЗ, аналогових ключів та багатоканальних комутаторів, джерел еталонних величин, аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів, компараторів, резистивних матриць. Показано, що для масштабуючих підсилювачів на базі прецизійних операційних підсилювачів /ОП/ та прецизійних резисторів основний вклад у похибку масштабування вносять складові, що викликані нестабільністю резисторів. Результати аналізу дійсні для інструментальних і для програмованих підсилювачів. Розроблено схемотехнічні рішення, які дозволяють зменшити

вплив цієї нестабільності на точність масштабуючих підсилювачів та підсилювачів з програмованим коефіцієнтом передачі. Ці рішення було покладено в основу створення освоєних у серійному виробництві модулів масштабуючих підсилювачів для перетворювачів АЦП-33, АЦП-34, АЦП-36, системи технічних засобів сполучення ЕОМ з об'єктом "Сектор" та міні-ЕОМ "Сокол", а також модулів автоматизованого вибору діапазона на базі програмованих підсилювачів для мікропроцесорних ПФІ у складі ПЕОМ.

Проаналізовані класичні схеми побудови функціональних логарифмічних підсилювачів, що використовують нелінійність вольт-амперної характеристики $p-n$ -переходу, рівняння якої має вигляд

$$U_{se} = \varphi_T \ln(I_{Bx}/I_0 + 1) + I_{Bx} z_{\delta}, \quad /25/$$

де I_{Bx} - струм у $p-n$ -переході; I_0 - тепловий струм; z_{δ} - опір бази; φ_T - температурний потенціал.

Область "невикривленого логарифмування" вольт-амперної характеристики $p-n$ -переходу лежить у діапазоні струмів $10^{-7} - 10^{-4}$ А. З метою розширення цієї області у діапазоні малих токів необхідно скомпенсувати вплив теплового струму I_0 , а у діапазоні великих струмів - скомпенсувати вплив вхідного струму. В роботі запропоновані схемотехнічні рішення, що дають змогу розширити діапазон функціонального логарифмічного підсилювача в області малих струмів - до 10^{-9} , а в області великих струмів - до 10^{-2} А. Модулі функціональних логарифмічних підсилювачів на основі запропонованих рішень освоєні у серійному виробництві і застосовані у складі пристроїв зв'язку з об'єктом "Сектор" та міні-ЕОМ "Сокол".

Виконано аналіз високоточних УВЗ, що побудовані за замкнутою схемою на основі операційного підсилювача. Розглянуті основні складові похибки УВЗ у режимах виборки, запам'ятовування та при переході з режиму виборки до режиму запам'ятовування. Розкриті основні шляхи зниження цих похибок у кожному з режимів. Розроблені схеми УВЗ з мінімальною складовою похибки у режимі запам'ятовування. Проаналізовані методи підвищення точності УВЗ. У створених на основі цих методів УВЗ максимальна похибка дорівнює 0,005 %. УВЗ з такими параметрами було використано у перетворювачах АЦП-34 та АЦП-34М.

Розкриті основні шляхи побудови високоточних аналогових ключів та комутаторів для мікропроцесорних ПФІ. Проаналізовані точнісні параметри комутаторів на основі n -МОП, p -МОП, КМОП та оптоелектронних ключів.

Проаналізовано методи підвищення точності джерел еталонних напруг та струмів /ДЕН та ДЕС/. Джерела еталонних струмів для мікропроцесорних ПФІ високої точності будуть за компенсаційною схемою. Існують два основні різновиди компенсаційних ДЕС: схема з негативним зворотним зв'язком і схема з датчиком температури.

В роботі показано, що створені на дискретних компонентах ДЕС з негативним зворотним зв'язком забезпечують температурний дрейф еталонного струму у межах тисячних часток відсотка на 1°C . З метою досягнення більш високої точності схема ДЕС повинна являти собою єдину систему відносно зміни температури навколишнього середовища. Таким умовам відповідає схема ДЕС з датчиком температури. Показано, що температурний дрейф таких ДЕС досягає $0,0001\% / ^{\circ}\text{C}$.

Найбільш точними ДЕН на сьогодні є джерела у вигляді гібридних ІС, тому що в умовах гібридної технології існує можливість індивідуальної поелементної компенсації похибки ДЕН. Розглянутий у роботі метод індивідуальної компенсації досить ефективний, коли процес вимірювання та обчислювання необхідних характеристик компенсуючого елемента повністю автоматизований. Побудовані таким чином ДЕН використовуються у І5-І8-розрядних ПФІ.

Методи підвищення точності джерел еталонних струмів та напруг, що проаналізовані в роботі, покладено в основу створення високоточних ДЕН та ДЕС для АЦП-34 і АЦП-36, а також для тонкоплівкових та товстоплівкових ВІС мікропроцесорних ПФІ.

У дисертації досліджені методи підвищення точності ЦАП. У зв'язку з тим, що похибка ЦАП являє собою суму методичної та інструментальної складових, показані шляхи зниження кожної із складових цієї похибки. Інструментальна похибка ЦАП включає в себе похибки елементів, що входять до складу ЦАП. Це - матриці резисторів, ключові елементи, джерела еталонних величин. Розглянуті та проаналізовані складові інструментальної похибки, які обумовлені нестабільністю параметрів основних елементів ЦАП. Досліджені похибки резистивних матриць на основі тонкоплівкових, об'ємних металоплівкових, мікродротових та фольгових резисторів. Показано, що часовий дрейф величини опору резистора тонкоплівкової матриці досягає $0,02\%$ на рік. Тому у ЦАП на основі тонкоплівкової матриці необхідно протягом року коректувати похибку, обумовлену відхиленням параметрів резисторів від номінальних. У ЦАП, точність яких становить І4 двійкових розрядів, слід використовувати матриці на основі мікродротових або металоплівкових об'ємних резисторів. Але резистори перелічених ти-

пів придатні лише для побудови модульних ЦАП, в зв'язку з цим в ЦАП у вигляді гібридних ВІС слід застосовувати фольгові резистори і матриці на їх основі, ТКО яких становить $\pm 3 \cdot 10^{-4} \% / ^\circ \text{C}$, а часова нестабільність дорівнює 0,004 % на рік. Температурна похибка ЦАП може бути визначена за допомогою рівняння

$$\delta_t = 2 \left[d_{cm} + \frac{U_{zc}/\Delta T}{U_{cm}} \cdot 10^{-4} + \frac{I_{zc}/\Delta T}{I_{cm}} \cdot 10^{-4} + \frac{1}{\beta_1 \beta_2} + \right. \\ \left. + (TKO_M \pm TKO_{Rem}) \cdot 10^2 \right] \% / ^\circ \text{C},$$

де d_{cm} - ТХН стабілітрона; U_{zc}, I_{zc} - напруга та струм зсуву підсилювача у складі ДЕС; β_1, β_2 - коефіцієнти передачі струмів транзисторів; TKO_M, TKO_{Rem} - температурні коефіцієнти опорів матриці та R_{em} .

Сума перших чотирьох членів /26/ у граничному випадку досягає 0,0008 %/ $^\circ \text{C}$, в той час як величина останнього члена /26/ може переважати сумарну похибку активних компонентів ЦАП більш ніж на порядок. Зменшити вплив цієї складової похибки ЦАП можливо, якщо ТКО матриці та R_{em} наближені за значенням і мають один і той самий знак, що забезпечує групова технологія виготовлення резисторів матриці та R_{em} .

Розглянуті методи належать до поелементних методів підвищення точності і можуть бути використані як в мікропроцесорних ПФІ, так і в ПФІ інших типів. В роботі запропоновано нові структурні рішення корекції інструментальної похибки ЦАП. Це структури ЦАП з кількома матрицями резисторів, ЦАП з джерелами коректуючих струмів та ЦАП з цифровою корекцією похибки. Ефективність застосування таких рішень у мікропроцесорних ПФІ обумовлена досить значним обсягом обчислювальних та керуючих операцій, що виконуються безпосередньо мікропроцесором.

У дисертації досліджені методи підвищення точності АЦП. Основну увагу віддано методам цифрової корекції передаточної характеристики АЦП, перевагу серед яких мають методи зразкових сигналів. За результатами аналізу математичних операцій, що виконує мікропроцесорний ПФІ під час корекції результатів перетворювання, визначено максимальний час корекції похибки зсуву, нахилу та нелінійності передаточної характеристики АЦП. Максимальний час корекції АЦП з урахуванням часу перетворювання зразкових сигналів визначається як

$$t_{кор} = (t_{пр} N + 20N + 500) [\text{мкс}],$$

де $t_{кор}, t_{пр}$ - відповідно час корекції та перетворювання ПФІ; N - кількість зразкових кодів у масиві

Досліджені методи корекції покладені в основу створення АЦП у складі мікропроцесорного набору гібридних ВІС.

У третій главі розкрита загальна характеристика методів підвищення продуктивності мікропроцесорних ПФІ, яка враховує особливості розвитку мікропроцесорної елементної бази. Показано, що основним є напрямок підвищення продуктивності ПФІ, який базується на удосконаленні технології ВІС та схемотехніки компонентів ПФІ. На основі зіставлення швидкості цифрових потоків інформації у мікропроцесорних системах обробки акустичних, звукових та радіосигналів з параметрами мікроелектронних ПФІ, що застосовуються у цих системах, визначені предметні області, для яких не існує мікроелектронних ПФІ. Розглянуто схемотехнічні методи підвищення продуктивності основних компонентів мікропроцесорних ПФІ /УВЗ, комутаторів, ключів, компараторів, АЦП і ЦАП/ з урахуванням можливостей сучасної мікроелектронної бази. Виконано аналіз часових параметрів УВЗ в кожному режимі роботи. У випадках, коли УВЗ з фіксованими часовими характеристиками не відповідає вимогам з продуктивності, запропоновано застосовувати УВЗ, часові характеристики яких адаптуються до швидкості змінення вхідного сигналу. Визначена структура і схемотехніка адаптивних УВЗ, обґрунтована доцільність застосування таких УВЗ в мікропроцесорних ПФІ. В роботі розглянуто особливості діодних аналогових ключів і комутаторів на їх основі, що використовуються у високопродуктивних ПФІ. Показано, що діодні ключі та комутатори на їх основі мають максимальну швидкість комутації сигналів в порівнянні з ключами і комутаторами на іншій елементній базі. З метою застосування таких комутаторів у високопродуктивних ПФІ з високими вимогами до точності запропоновано схемотехнічні рішення, що дають змогу підвищити точність аналогових діодних ключів.

Шляхом аналізу показано, що широкий клас задач, орієнтованих на цифрову обробку сигналів у мікропроцесорних ПФІ в реальному масштабі часу, не забезпечено параметрами АЦП, які побудовані за однією з класичних структур. Проаналізована узагальнена структура комбінованого АЦП для високопродуктивних ПФІ, розкриті особливості реалізації вузлів та елементів комбінованих АЦП – паралельних АЦП, ЦАП, пристроїв віднімання, компараторів тощо. Показано, що розвиток компараторів для високопродуктивних ПФІ відбувається у двох взаємопов'язаних напрямках. Перший напрямок полягає в підвищенні чутливості та зменшенні затримки переключення за рахунок удосконалення технології компараторів напр., гн, другий напрямок пов'язаний з розробкою

мікроелектронних компараторів струму і застосуванням їх у схемах АЦП замість компараторів напруги. В роботі розглянуто схемотехніку компараторів струму.

Визначена технологія і схемотехніка багатоканальних ПФІ з високою ідентичністю вхідних-вихідних каналів, що важливо при поєднанні операцій перетворення та обробки сигналів у кожному інформаційному каналі мікропроцесорного ПФІ.

Результати, отримані у третій главі, дали змогу створити ряд діючих зразків високопродуктивних мікропроцесорних ПФІ /"Перетворювач-1", "Перетворювач-2", АЦП-26, а також набір тонкоплівкових ГІС для обробки швидких процесів у мікропроцесорних ПФІ/.

Методи підвищення надійності мікропроцесорних ПФІ проаналізовані у четвертій главі. Показано недостатність аналізу та оцінку надійності мікропроцесорних ПФІ за допомогою традиційних властивостей надійності - безвідмовності, ремонтпридатності, довговічності та збережуваності. ПФІ - це складні програмовані пристрої, на основі яких будуються системи автоматизації, контролю та керування. Усталені режими та умови експлуатації таких систем можуть порушуватися, однак при цьому працездатність мікропроцесорних ПФІ повинна зберігатися хоча б частково. Здатність мікропроцесорних ПФІ зберігати основні функції при порушенні режимів та умов експлуатації, а також у випадках відмови окремих елементів і вузлів характеризується такими властивостями, як відмовостійкість та живучість. За допомогою цих властивостей аналізується працездатність резервованих пристроїв, орієнтованих на важкі умови експлуатації. Здійснені дослідження покладені в основу створення державних стандартів /перша редакція/, в яких наведено визначення відмовостійкості та живучості засобів обчислювальної техніки, запропоновані методи випробувань засобів обчислювальної техніки, включаючи мікропроцесорні ПФІ, на відмовостійкість та живучість.

Максимальний час напрацювання на відмову сучасних мікропроцесорних ПФІ не перевищує 10 тис.годин. Середній час напрацювання на відмову мікропроцесорних ПФІ у каналах захисту АСУ ТП і технологічних контролерів має становити 200 тис.годин, в каналах автоматичного регулювання - 100, в каналах керування - 50, в каналах контролю - 20 тис.годин. З наведеного випливає, що сучасні мікропроцесорні ПФІ за показниками надійності не задовольняють вимогам систем автоматизації, контролю й керування. В роботі показано, що істотне підвищення надійності мікропроцесорних ПФІ полягає у

поєднанні конструктивно-технологічних методів з традиційними методами підвищення надійності, тобто у заміні друкованих плат наборами гібридних ВІС та гібридних інтегральних функціональних пристроїв, уведенні надлишковості у технічні засоби та програмне забезпечення мікропроцесорних ПФІ, підвищенні якості вхідного контролю мікропроцесорних ПФІ, їх елементів та вузлів.

На основі порівняльної оцінки конструктивно-технологічних методів підвищення надійності показано, що виробництво мікропроцесорних ПФІ на основі технології багатокристалльних модулів /розвиток технології ГІС/ і гібридних інтегральних функціональних пристроїв дозволяє на один-два порядки підвищити напрацювання на відмову ПФІ, орієнтованих на роботу в екстремальних умовах експлуатації.

Технологія ГІС та гібридних інтегральних функціональних пристроїв при виробництві мікропроцесорних ПФІ добре поєднується з структурними методами підвищення надійності, причому резервування в мікропроцесорних ПФІ здійснюється на рівні компонентів ГІС /для найбільш важливих каналів/, на рівні ГІС та на рівні гібридного інтегрального функціонального пристрою. На основі аналізу структурних методів підвищення надійності сформульовано та розв'язано задачу оптимального резервування мікропроцесорних ПФІ, орієнтованих на технологію ГІС та гібридних інтегральних функціональних пристроїв.

В роботі досліджено метрологічні відмови мікропроцесорних ПФІ. Обґрунтовано застосування методів математичного моделювання та запропоновано класифікацію математичних моделей для дослідження метрологічних відмов та визначення параметрів метрологічної надійності мікропроцесорних ПФІ. Вибір математичної моделі для дослідження метрологічної надійності мікропроцесорного ПФІ ґрунтується на ступеню адекватності математичної моделі деградаційного процесу реальному процесу деградації вимірjuвального каналу ПФІ. Запропоновано застосувати *DN*-розподіл для моделювання метрологічних відмов мікропроцесорних ПФІ, що з урахуванням апріорної інформації про фізичні процеси деградації дозволяє отримати найбільш вірогідну кількісну оцінку параметрів метрологічної надійності мікропроцесорних ПФІ. Наведено класифікацію і здійснено аналіз методів підвищення метрологічної надійності. Розглянуто можливості структурних, технологічних та схемотехнічних методів підвищення метрологічної надійності, наведені рекомендації щодо ефективного застосування цих

методів у мікропроцесорних ПФІ.

Досліджено методи підвищення надійності програмного забезпечення /ПЗ/ мікропроцесорних ПФІ. В зв'язку з відсутністю загальних принципів і методів побудови надійного ПЗ для мікропроцесорних ПФІ на основі аналізу запропоновано при побудові такого ПЗ використовувати методи та принципи забезпечення надійності ПЗ, що застосовують у обчислювальних системах, з урахуванням таких особливостей мікропроцесорних ПФІ, як робота у реальному масштабі часу, малий обсяг оперативної та постійної пам'яті, та ін. В роботі розкрито особливості прикладного ПЗ мікропроцесорних ПФІ, що підтримує відмовостійкість апаратних засобів.

Результати досліджень по забезпеченню надійності мікропроцесорних ПФІ застосовано при створенні мікропроцесорного набору гібридних ВІС, розробленого в Інституті кібернетики імені В.М.Глушкова АН України сумісно з Державним інженерним центром мікроелектроніки та освоєного у промисловому виробництві на ВО "Київський радіозавод". Набір гібридних ВІС - це конструктивно та функціонально закінчені вироби, що за допомогою стандартних інтерфейсів поєднуються у розподілені системи автоматизації, контролю та обробки даних з необхідною кількістю аналогових, дискретних, частотно-часових вхідних та вихідних каналів, необхідним обсягом постійної та оперативної пам'яті та рівнем резервування.

У п'ятій главі розглянуто функціональні методи підвищення продуктивності мікропроцесорних ПФІ, що дають змогу підвищити продуктивність ПФІ за рахунок математичної обробки вхідних сигналів, причому в ПФІ ця обробка може виконуватися і аналоговою, аналого-цифровою та цифровою формі. Вибір способу обробки залежить від типу задачі, класифікацію яких здійснено у роботі. Для оцінки функціональної продуктивності мікропроцесорних ПФІ запропоновано поняття обчислювальної потужності, що має вигляд

$$\rho = S^2 / (St_k + t_{\text{цпл}}),$$

де S - максимальна кількість команд у програмі; t_k - час виконання однієї команди; $t_{\text{цпл}}$ - час перетворювання АЦП.

У роботі розкриті особливості системної орієнтації мікропроцесорних ПФІ з обробкою сигналів, розглянуті нові структури та здійснено аналіз похибок мікропроцесорних ПФІ для обчислення параметрів спектральних кривих у цифровій та аналого-цифровій формі. Проаналізовано похибки мікропроцесорних ПФІ для визначення взаємної кореляційної функції на основі методу безпосереднього множення

з урахуванням кількості рівней квантування, інтервалів дискретизації, обмеженого обсягу вибірки та неідентичності дискретизації двох випадкових сигналів. Проблема створення мікропроцесорних ПФІ для визначення взаємної кореляційної функції з високим ступенем ідентичності каналів дискретизації вирішена у мікропроцесорних ПФІ "Перетворювач-1" та "Перетворювач-2".

Розглянуто методи побудови мікропроцесорних ПФІ для формування функцій заданої форми на основі методів апроксимації початкової функції степеневими поліномами. Вивчена проблема точності поліноміальної апроксимації. Показано, що при визначенні точності поліноміальної апроксимації необхідно, крім величини залишкового члена розкладу, враховувати значення похибки обчислення, залежність цієї похибки від степеня апроксимуючого полінома. Незалежно від точності метода апроксимації результуюча точність може суттєво зменшитися, якщо некоректно обрана схема інтерполюючого вузла мікропроцесорного ПФІ. Внаслідок аналізу отримано вирази, за допомогою яких визначається загальна похибка обчислення, максимальна похибка відновлення функції, здійснюється вибір оптимального степеня апроксимуючого полінома. З урахуванням цих досліджень запропоновано схемні рішення мікропроцесорних ПФІ для відновлення функцій довільної форми, визначені вирази для аналізу продуктивності таких ПФІ.

У роботі показано, що модулі професійної орієнтації являють собою ефективний засіб підвищення функціональної продуктивності ПЕОМ і систем на їх основі.

Розкриті особливості розроблених за безпосередньою участю автора модулів професійної орієнтації, продуктивність яких згідно з визначеними оцінками суттєво переважає продуктивність спеціалізованих мікропроцесорних ПФІ, що орієнтовані на конкретну задачу чи клас задач.

Проблема вимірювання параметрів, контролю та діагностики мікропроцесорних ПФІ розв'язується у шостій главі дисертації.

Внаслідок аналізу параметрів вузлів та елементів мікропроцесорних ПФІ виділено клас квазидинамічних параметрів, до яких відносяться час установалення сигналів з заданою точністю на виході масштабуючих, програмованих і функціональних підсилювачів, на виході ЦАП, на виході керованих джерел напруги та струму; час спаду сигналу на виході УВЗ, похибка запам'ятовування якого задана; апертурний час УВЗ та АЦП. Труднощі визначення таких параметрів полягають в тому, що протягом малого часового інтервалу /одиниці чи

частки мікросекунди/ необхідно здійснити вимірювання з похибкою до сотих часток відсотка. Стандартні засоби вимірювання таких параметрів практично відсутні. У роботі запропоновано методи та схеми, на основі яких створено вимірювачі квазідинамічних параметрів серійних та дослідних зразків елементів та вузлів мікропроцесорних ПФІ.

Контроль і діагностика мікропроцесорних ПФІ дають змогу розв'язати такі задачі:

1. Перевірка працездатності мікропроцесорних ПФІ.
2. Пошук дефектних елементів мікропроцесорних ПФІ.
3. Повірка вимірювальних каналів мікропроцесорних ПФІ.
4. Прогнозування стану мікропроцесорних ПФІ.
5. Пошук та виправлення похибок у програмному забезпеченні мікропроцесорного ПФІ.

Шляхи розв'язання першої, другої та третьої задачі розглянуто у шостій главі дисертації. За результатами аналізу визначені показники контролездатності ПФІ як об'єкта діагностики. Досліджена формалізована процедура вибору сукупності показників контролездатності мікропроцесорних ПФІ. Запропоновано класифікаційні ознаки упорядкування методів діагностики мікропроцесорних ПФІ. Розглянуто методи функціональної, тестової та параметричної діагностики ПФІ. Наведено процедуру вибору оптимального методу діагностики мікропроцесорного ПФІ, визначено умови оцінки працездатності ПФІ, запропоновано критерії оцінки працездатності ПФІ та його вузлів, показано, що усі три групи методів дають змогу розв'язати чотири основні задачі діагностики мікропроцесорних ПФІ.

Розкрито зв'язок класифікаційних ознак мікропроцесорних ПФІ і систем діагностики, що дало змогу сформулювати вимоги та запропонувати комплексний підхід до створення систем діагностики на базі ПЕОМ для мікропроцесорних ПФІ. Визначена задача внутрисхемної та внутрисистемної діагностики ПФІ. Розглянуто особливості застосування та шляхи реалізації таких методів визначення динамічної похибки мікропроцесорного ПФІ для розрахунково-експериментального метода, метода на основі відновлення початкової форми вхідного сигналу та метода на основі компенсації похибки відновлення шляхом обробки цифрових відліків.

Сформульовані задачі метрологічної атестації і повірки мікропроцесорних ПФІ. Визначені співвідношення для вибору мінімальної кількості точок, у яких необхідно здійснювати атестацію і повірку

мікропроцесорних ПФІ.

Одержані результати дозволили розробити та створити ряд систем контролю, діагностики, метрологічної атестації і повірки серійних та знов створюваних мікропроцесорних ПФІ.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У дисертації здійснено теоретичне узагальнення досліджень в області проектування перетворювачів форми інформації, на основі якого розвинута теорія мікропроцесорних ПФІ, розроблені методи підвищення точності, надійності і продуктивності пристроїв даного класу, розв'язача проблема створення мікропроцесорних перетворювачів форми інформації підвищеної надійності і продуктивності, що має важливе народногосподарське значення.

Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень:

1. Розроблені загальні методи аналізу точності, надійності та продуктивності мікропроцесорних ПФІ, що дозволяють на структурному рівні визначити переважачі складові похибки перетворювання, установити робочу область, в межах якої забезпечується безвідмовне функціонування ПФІ, визначити продуктивність кожного структурного елемента або ПФІ в цілому.

2. Сформульована та у загальному вигляді розв'язана задача оптимізації мікропроцесорних ПФІ за критеріями точності, надійності та продуктивності. Одержані результати дають змогу синтезувати структуру мікропроцесорного ПФІ з заданою точністю, надійністю та продуктивністю.

3. Досліджені, розроблені і реалізовані в освічених промисловості зразках системотехнічні і технологічні методи підвищення точності, продуктивності і надійності мікропроцесорних ПФІ, їх основних вузлів і компонентів: аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачів, програмованих, масштабуючих і функціональних підсилювачів, підсилювачів виборки та запам'ятовування, аналогових ключів і комутаторів.

4. Визначені поняття відмовостійкості та живучості стосовно засобів обчислювальної техніки. З точки зору відмовостійкості та живучості здійснена оцінка працездатності розроблених та створених за безпосередньою участю автора мікропроцесорних наборів гібридних ВІС для систем автоматизації, контролю і керування, що орієнтовані на екстремальні умови експлуатації.

5. На основі порівняльної оцінки технологічних методів підвищення надійності показано, що найбільш конструктивним технологічним рішенням підвищення надійності мікропроцесорних ПФІ є технологія багатокристалльних модулів та гібридних інтегральних функціональних пристроїв, яка дозволяє на один-два порядки підвищити напруження на відмову мікропроцесорних ПФІ, що призначені для важких умов експлуатації.

6. Розв'язана задача оптимального резервування мікропроцесорних ПФІ, глибина резервування яких доведена до рівня компонентів ВІС. Розкрито основні функції прикладних програм по забезпеченню відмовостійкості та живучості апаратних засобів мікропроцесорних ПФІ.

7. Одержані критеріальні оцінки функціональної продуктивності мікропроцесорних ПФІ. Здійснено аналіз похибок мікропроцесорних ПФІ для обчислення параметрів спектральних кривих, для обчислення взаємної кореляційної функції, для відновлення функції довільної форми. Визначена залежність впливу неідентичності дискретизації на точність обчислення взаємної кореляційної функції, отримано вирази для оцінки похибок обчислення і відновлення функції, які дають змогу вибрати оптимальний ступінь апроксимуючого полінома.

8. В результаті аналізу статичних та динамічних параметрів вузлів та елементів мікропроцесорних ПФІ виділено клас квазідинамічних параметрів, до якого відносяться час установлення сигналів з заданою точністю на виході масштабуємих, програмованих і функціональних підсилювачів, на виході керуваніх джерел еталонних струмів та напруг, на виході ЦАП, час спаду сигналу на виході УВЗ з заданою похибкою запам'ятовування; апертурний час УВЗ і АЦП. Досліджені, розроблені і реалізовані схеми і методи для вимірювання квазідинамічних параметрів ПФІ, на основі яких створені вимірювачі цих параметрів у серійних та дослідних зразках мікропроцесорних ПФІ.

9. Сформульовані основні задачі контролю та діагностики мікропроцесорних ПФІ. Визначено показники контролездатності, досліджено і доведено до реалізації формалізовану процедуру вибору сукупності показників контролездатності мікропроцесорних ПФІ. Розкрито вимоги та запропоновано загальний підхід до створення на базі ПЕОМ систем діагностики, перевірки та атестації мікропроцесорних ПФІ в умовах виробництва та експлуатації.

10. Результати дисертації впроваджено на підприємствах України та країн ближнього зарубіжжя при серійному виробництві модулів професійної орієнтації для ПЕОМ серії ЕС, при виробництві дослідної партії мікропроцесорних наборів товстоплівкових та тонкоплівкових великих інтегральних схем, при виробництві перетворювачів для апаратури високоточного магнітного запису /ПФІ-1, ПФІ-2/, для систем автоматизації наукових експериментів /АПП-26, АПП-33, АПП-34, АПП-36/, при створенні АРМ випробування, контролю і діагностики серійних ПФІ та їх компонентів.

Основний зміст і результати дисертації викладено у таких роботах:

1. А. с. 327602, СССР. МКИ НОЗК 13/20. Аналого-цифровой преобразователь / В.И. Заболотный, Д.М. Калниболотский, В.А. Романов. - Оpubл. 21.01.72, Бюл. N5.

2. А. с. 356778, СССР. МКИ НОЗК 13/20. Аналого-цифровой преобразователь /В.И. Заболотный, Д.М. Калниболотский, В.А. Романов. - Оpubл. 23.10.72, Бюл. N32.

3. А. с. 391610, СССР. МКИ G11C 27/00. Запоминающее устройство / В.А. Романов, П.М. Сиверский. - Оpubл. 23.11.73, Бюл. N31.

4. А. с. 545978, СССР. МКИ НОЗК 13/17. Аналого-цифровое устройство для определения параметров спектральных кривых /В.А. Романов, В.А. Багацкий. - Оpubл. 30.01.73, Бюл. N4.

5. А. с. 556462, СССР. МКИ G06J 1/01. Аналого-цифровое устройство для определения параметров спектральных кривых /В.А. Романов. - Оpubл. 30.04.77, Бюл. N16.

6. А. с. 659999, СССР. МКИ G01R 31/30. Устройство для определения времени установления выходного напряжения цифро-аналогового преобразователя /П.С. Ключан, В.А. Романов. - Оpubл. 30.04.79, Бюл. N16.

7. А. с. 692079, СССР. МКИ НОЗК 13/05. Цифро-аналоговый преобразователь /П.С. Ключан, В.Н. Лаврентьев, В.А. Романов. - Оpubл. 15.10.79, Бюл. N38.

8. А. с. 942131, СССР. МКИ G11C 7/00. Усилитель выборки и запоминания СССР, для аналого-цифрового преобразователя / В.А. Романов. - Оpubл. 07.07.82, Бюл. N25.

9. А. с. 1196948, СССР. МКИ G11C 7/00. Усилитель выборки и

- запоминания для аналого-цифрового преобразователя / В.А. Романов. - Оpubл. 07.12.85, Бюл. N45.
10. А. с. 529464, СССР. МКИ G06G 7/24. Аналоговый логарифмический преобразователь / В.А. Романов, Л.В.Тесленко. - Оpubл. 15.11.86, Бюл. N40.
11. А. с. 1370773, СССР. МКИ H03K 17/74. Мостовой диодный коммутатор / В. А. Романов, В.А. Давиденко. - Оpubл. 07.01.88, Бюл. N4.
12. А. с. 1478203, СССР. МКИ G06F 1/02. Генератор кусочно-линейных функций /Л.Е.Хорин, В.А. Романов, В.Н.Чинок, В.Е.Мартыненко. - Оpubл. 07.05.89, Бюл.N17
13. А. с. 1589323, СССР. МКИ G11C 7/00. Усилитель выборки и запоминания / В.А. Романов, В.А. Давиденко. - Оpubл. 30.08.90, Бюл. N32.
14. Справочник по персональным ЭВМ / Н.И.Алишов, Н.В.Нестеренко, В.В.Новиков, В.А.Романов и др.; Под ред. чл.-кор. АН Украины В.Н.Малиновского. - Киев: Техника, 1990. - 384 с.
15. Вопросы проектирования преобразователей формы информации / А.И.Кондалев, А.Н.Никитин, В.А.Багацкий, В.А.Романов и др. - Киев: Наук.думка. - 1977. - 242 с.
16. Высокпроизводительные преобразователи формы информации / А.И.Кондалев, В.А.Багацкий, В.А.Романов, В.А.Фабричев - Киев: Наук.думка, 1987. - 280 с.
17. Гончарук Т.И., Романов В.А., Тесленко Л.В. Система контроля параметров аналого-цифровых ГИС на базе ПЭВМ // Микропроцессорные системы и их применение. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН УССР, 1990. - С.53-57.
18. Гончарук Т.И., Тесленко Л.В., Романов В.А. Цифровая коррекция погрешностей в микроэлектронных АЦП // Преобразователи формы информации и средства передачи данных. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН УССР, 1985. - С.8-13.
19. Давиденко В.А., Романов В.А. Преобразователи формы информации для аппаратуры цифровой магнитной записи // Высокпроизводительные средства преобразования, обработки и передачи информации. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова, АН УССР, 1987. - С.4-7.
20. Ключан П.С., Реутов В.В., Романов В.А. ГИС повышенной надежности для АСУТП и их метрологическое обеспечение. - Киев: О-во "Знание" УССР, 1990. - 20 с.

21. Ключан П.С., Романов В.А. Анализ погрешностей источников эталонных токов ЦАП на интегральных схемах // Проблемы передачи и преобразования информации. - Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1977. - С.19-34.

22. Аналого-цифровой преобразователь АЦП-34 / А.И.Кондалев, В.А.Романов, П.С.Ключан и др. - УСИМ - 1978 - №5. - С.93-98.

23. Преобразователи формы информации для контрольно-измерительных систем и вычислительных комплексов / А.И.Кондалев, П.С.Ключан, В.Н.Лаврентьев, В.А.Романов // Проблемы создания преобразователей формы информации. - Киев: Наук.думка, 1980. - Ч.2. - С.12-20.

24. Кондалев А.И., Романов В.А. О выборе оптимальной разрядности аналого-цифрового преобразователя в устройствах сбора экспериментальных данных // УСИМ. - 1973. - №1 - С. 103- 105.

25. Кондалев А.И., Багацкий В.А., Романов В.А. Организация преобразователей формы информации в гибридных вычислительных системах // Труды международной конференции "Электроника в измерениях" (Париж, 1975) - С.469 -476.

26. Высокопроизводительные преобразователи формы информации АЦП-36 и ПКМ-1 / А.И.Кондалев, В.А.Романов, П.С.Ключан и др. // УСИМ. - 1985. - №6. - С.126-128.

27. Оптимальное согласование датчиков с аналого-цифровым преобразователем / Б.Н.Малиновский, А.И.Кондалев, В.А.Багацкий, В.А. Романов // Труды международной конференции "Дни электроники - 1973. АЦП и ЦАП" (Лованна, 1973). - С.571-575.

28. Микропроцессорный комплект гибридных интегральных схем для построения надежных систем управления / А.В.Палагин, В.А.Романов, Ю.А.Брайко и др. // Электронное моделирование. - 1993. - №3. - С.43-51.

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

30. Преобразователи формы информации для обработки биомедицинских сигналов ПКМ-1 и ПКМ-2 / В.А.Романов, В.А.Давиденко, П.С.Ключан и др. // Электронная промышленность. - 1986. - Вып.10. - С.20-22.

31. Романов В.А. Аналого-цифровые микропроцессоры в информационно-измерительных и управляющих системах. - Киев: 0-во

"Знание" Украинской ССР, 1984. - 16 с.

32. Романов В.А. Аналого-цифровой преобразователь повышенной точности // Преобразование, передача и обработка информации в высокопроизводительных микропроцессорных системах. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН УССР, 1983. - С.3-7.

33. Романов В.А. Модули ввода-вывода аналоговых сигналов для персональных ЭВМ // Преобразователи формы информации и средства передачи данных. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН УССР, 1986. - С.12-14.

34. Романов В.А. Методы и средства обеспечения надежности микропроцессорных ПЭВМ // Проблемы создания преобразователей формы информации: Тез. докл. 7-го симп. (Киев, 27-29 окт. 1992 г.). - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН Украины, 1992. - С.5-6.

35. Романов В.А. Методы исследования метрологической надежности преобразователей формы информации // Средства получения и обработки цифровой информации. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН Украины, 1993. - С.42-48.

36. Романов В.А. Методы повышения надежности микровзрывчатых и микропроцессорных устройств. - Киев: О-во "Знание" Украины, 1992. - 32 с.

37. Романов В.А. Об оценке производительности аналого-цифровых микропроцессоров // Проблемы создания преобразователей формы информации. - Киев: Наук. думка, 1984. - Ч.1. - С.69-72.

38. Романов В.А. Определитель параметров спектральных кризисов на основе преобразователя АЦП-34 // Вестн. Киев. политехн. ин-та. Автоматика и электроприборостроение. - 1982. - Вып.19. - С.119-122.

39. Романов В.А. Проблемно-ориентированный комплекс для систем экологического мониторинга // Проблемно-ориентированные комплексы для автоматизации контроля и управления. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН Украины, 1993. - 78 с.

40. Романов В.А. Быстродействующие АЦП - современное состояние, методы построения, элементная база. - Киев: О-во "Знание" УССР, 1979. - 20 с.

41. Романов В.А. Модульный набор для расширения возможностей преобразователей формы информации // Проблемы создания преобразователей формы информации. - Киев: Наук. думка, 1980. - Ч.2. - С.122-126.

42. Романов В.А. Усилитель выборки и запоминания для аналого-цифрового преобразователя АПП-ЗЗМ // Там же. - С.16-22.

43. Романов В.А. Аналоговое запоминающее устройство повышенной точности // Системы сбора и обработки измерительной информации. - Таганрог: ТРТИ. - 1980. - Вып.2. - С.17-23.

44. Романов В.А. Устройство автоматического выбора диапазона АПП на основе программируемого усилителя // Преобразователи формы информации и средства передачи информации. Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1979. - С.83-88.

45. Романов В.А. Система контроля параметров гибридных интегральных схем на базе ПЭВМ и модулей профессиональной ориентации // Системы контроля параметров электронных устройств и приборов: Материалы конф. - Киев. - ЦНИИИ и ТЭИ, 1990. - С.22-23.

46. Романов В.А. Підвищення надійності мікроелектронних мікропроцесорних пристроїв: Метод. вказівки. - Київ: КПІ, 1992. - 40 с.

47. Романов В.А. Быстродействующий 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь // Высокопроизводительные преобразователи формы информации и средства передачи данных. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН УССР, 1984. - С.3-8.

48. Романов В.А. Оптимальное резервирование в технологических контроллерах // Методы, системы и средства автоматизации научных исследований. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН Украины, 1992. - С.4-8.

49. Романов В.А. Повышение живучести систем автоматизации и обработки данных на основе больших гибридных интегральных схем // Алгоритмы и технические средства обработки сигналов. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН Украины. 1992. - С.23-29.

50. Романов В.А. Усилитель выборки и запоминания для аналого-цифрового преобразователя АПП-ЗЗМ // Проблемы преобразования и передачи информации. - Киев: ИК АН УССР, 1980. - С.16 - 22.

51. Романов В.А. Микропроцессорные ПКМ в системах контроля и управления // Вопросы проектирования и практического использования ПКМ в управляющих вычислительных комплексах. Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН УССР, 1990. - С.7-9.

52. Романов В.А. Устройство для измерения временных пара-

метров усилителей выборки и запоминания // Средства передачи, преобразования и обработки информации для высокопроизводительных систем и сетей. — Киев : Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова АН Украины, 1985. — С. 3—5.

53. Романов В. А. Цифро-аналоговый преобразователь повышенной точности, совместимый с микроЭВМ // Преобразователи формы информации для микропроцессорных систем. — Киев : Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова АН УССР, 1982. — С. 14—18.

54. Романов В. А., Ключан П. С., Тесленко Л. В. Элементы и узлы преобразователей формы информации в интегральном исполнении // Вопросы теории и проектирования преобразователей информации. Киев : О-во «Знание» УССР, 1975. — С. 20—21.

55. Романов В. А., Ключан П. С. Исследование временных характеристик аналоговых элементов АЦП на интегральных схемах / Вопросы проектирования устройств преобразования и передачи информации. — Киев : Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова АН УССР, 1975. — С. 39—48.

56. Романов В. А., Ключан П. С. Об измерении параметров элементов и узлов преобразователей формы информации с помощью специализированных технических средств // Преобразование и передача информации. Киев : Ин-т кибернетики АН УССР, 1978. — С. 55—61.

57. Романов В. А., Ключан П. С. Преобразователи формы информации для персональных ЭВМ. — Киев : О-во «Знание» УССР, 1988. — 16 с.

58. Аналого-цифровые гибридные интегральные схемы с широкими функциональными возможностями / В. А. Романов, А. А. Снегур, М. Д. Кардашук и др. — УСиМ, 1988. — № 5. — С. 12—14.

59. Тесленко Л. В., Романов В. А. Аналоговый логарифмический преобразователь повышенной точности // Технические средства обработки информации для высокопроизводительных ЭВМ и систем. — Киев : Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова АН УССР, 1988. — С. 28—31.

60. Тесленко Л. В., Романов В. А., Ключан П. С. Модуль масштабирования и коммутации аналоговых сигналов для персональных ЭВМ // Системы и средства цифровой обработки сигналов. — Киев : Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова АН УССР, 1989. — С. 74—78.

61. Технические и программные средства измерения параметров высокоточных АЦП / Т. И. Гончарук, П. С. Ключан, В. А. Романов, Л. В. Тесленко // Проблемы создания преобразователей формы информации. — Киев : Наук. думка, 1984. — Ч. 2. — С. 56—58.

62. Хорин Л. Е., Романов В. А. Влияние степени аппроксимирующего полинома на точность восстановления функций // УСиМ. — 1990. — № 6. С. 28—31.

63. Принципы организации проблемно-ориентированных комплексов для автоматизации производственно-технологических процессов / Багацкий В. А., Брайко Ю. А., Имамудинов Р. Г., Ключан П. С., Корытная Л. А., Романов В. А., Трохименко В. С., Фабричев В. А. — Киев, 1993. — 33 с. — (Препр. / АН Украины. Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова; 93-96).

В. Романов

459/20

Ав 29.146

Підп. до друку 23.12.93. Формат 60×84/16. Папір друк. №2. Офс. друк
Ум. друк. арк. 1,86. Ум. фарбо-відб. 1,98. Об.-вид. адк. 2,0. Тираж 100
прим. Зам. 1776.

Редакційно-видавничий відділ з поліграфічною дільницею
Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова АН України
252207 Київ 207, проспект Академіка Глушкова, 40