

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”**

На правах рукопису

Міненко Олександр Петрович

УДК 621.396: 658.562

**Аналогові сигнатури нелінійності та діагностичні моделі
інтегральних мікросхем.**

Спеціальність 05.13.08 – Обчислювальні машини, системи
та мережі, елементи та пристрої
обчислювальної техніки та систем
управління

Автореферат

дисертації на здобуття вченого ступеню кандидата технічних наук



Дисертація є рукописом.

Робота виконана у Національному технічному університеті України "КПІ".

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор Сердюк Гай Борисович

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор Тоценко Віталій Георгієвич
кандидат технічних наук Семагіна Євеліна Петрівна

Провідна організація – Інститут проблем реєстрації інформації НАН України

Захист дисертації відбудеться "21" листопада 1996 р. о 14³⁰ години на засіданні Спеціалізованої Ради по присудженню вченого ступеню кандидата технічних наук Д01.02.06 в Національному технічному університеті "КПІ" за адресою 252056, Київ-56, пр. Перемоги, 37, корп. 18, ауд. 306

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотечі Національного технічного університету України "КПІ".

Автореферат розіслано "14" вересня 1996 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої Ради,
доктор технічних наук

Бузовський О В

Анотація

Метою дисертаційної роботи є дослідження шляхів підвищення точності та ефективності інструментальних засобів отримання діагностичної інформації про фізичний та технічний стан елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління, та зокрема ІС, вивчення можливостей побудови аналітичних діагностичних моделей ІС та їх використання при організації електрофізичного діагностування за ефектами нелінійності.

Для досягнення поставленої мети розв'язувалися такі задачі:

- аналіз інформаційних особливостей аналогових сигнатур нелінійності (АСН) елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління, як певної форми відображення перебігу електрофізичних процесів у фізичному середовищі об'єкту діагностування (ОД) та аналіз областей їх можливого застосування для розв'язання практичних діагностичних задач;
- дослідження можливостей побудови неполіноміальних моделей відгуку ОД на тестовий сигнал та пошук співвідношень для відображення методичної похибки реєстрації АСН, що використовуються на використанні таких моделей;
- аналіз можливостей створення методики нерівномірної дискретизації АСН ІС, що забезпечувала б значне заощадження ресурсів, необхідних для визначення АСН;
- розробка методики створення аналітичних діагностичних моделей ІС для використання в процесі електрофізичного діагностування;
- пошук методики для обчислення реакції параметричної моделі ІС на зовнішній вплив та розгляд питань, пов'язаних з її практичною реалізацією.

Автор вносить на захист:

1. Метод зменшення методичної похибки визначення АСН елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління, що ґрунтується на використанні інтегральних моделей відгуку ОД на тестовий сигнал.
2. Методику нерівномірної дискретизації АСН елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління в процесі визначення, що сприяє значному заощадженню часу та ресурсів.
3. Методику побудови аналітичної діагностичної моделі ІС та відображення змін фізичного стану ІС в її параметрах.
4. Методику обчислення відгуку параметричної моделі ІС на тестовий сигнал, що ґрунтується на алгебраїзації диференційно-алгебраїчної моделі за допомогою диференційно-тейлорівських спектрів функцій часу.

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми Особлива роль у вирішенні завдань підвищення якості та надійності елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління належить електрофізичним методам діагностування з використанням інтегральних електрофізичних ефектів. Це обумовлено можливістю використання таких методів не тільки для визначення поточного технічного (фізичного) стану об'єкту діагностування, але також і для прогнозування надійності елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління та для аналізу відмов. Дані методи можуть використовуватися як для атестаційного контролю на технологічних операціях виготовлення, так і для приймального контролю у виробництві і відного контролю при використанні.

Процес електрофізичного діагностування полягає в отриманні інформації про фізичний стан (ФС) ОД з наступним прийняттям рішення про вид стану при використанні певних діагностичних моделей (ДМ). Ефективність електрофізичного діагностування визначається як способом отримання діагностичної інформації про ОД, так і відповідністю ДМ цілям діагностування. Тому задача підвищення точності та ефективності інструментальних засобів отримання діагностичної інформації, а також розробки методів побудови ДМ ОД, що можуть бути ефективно використаними для аналізу діагностичної інформації, є актуальною.

Методи дослідження. При проведенні досліджень та розробок в дисертаційній роботі використовувались методи математичного моделювання, обчислювальної математики, основні засади теорії автоматичного керування, теоретичних основ електротехніки та електроніки, спектрально-часові методи аналізу нелінійних систем.

Наукова новизна. В дисертаційній роботі отримані такі наукові результати:

- розроблено метод зменшення методичної похибки визначення АСН елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління, що ґрунтується на новому класі моделей відгуку об'єкту діагностування на тестовий сигнал;
- розроблено методіку нерівномірної дискретизації АСН елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління в процесі визначення, що сприяє значному заощадженню часу та ресурсів;
- розроблено методіку побудови аналітичної діагностичної моделі ІС та відображення змін фізичного стану ОД в параметрах моделі;
- розроблено методіку обчислення відгуку ПМ ІС на ТС, що ґрунтується на алгебраїзації диференційно-алгебраїчної моделі ОД за допомогою диференційно-теїлорівських спектрів функцій часу.

Практична цінність роботи полягає у створенні методів для підвищення точності та ефективності інструментальних засобів визначення АСН елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління, побудови інформативних та вірогідних ДМ ІС, придатних для використання при вирішенні широкого спектру діагностичних задач.

Впровадження результатів. Робота виконана на кафедрі автоматіки та управління в технічних системах (АУТС) Національного технічного університету України "КПІ". Наукові дослідження проводились в рамках госпдоговірних робіт: №328 "Исследование и разработка электрофизических методов диагностирования МОП БИС по интегральным эффектам нелинейности с целью прогнозирования постепенных отказов"; №65 "Автоматизированная установка для диагностирования интегральных микросхем по характеристикам нелинейности"; №20 "Розробка методіки електрофізичного діагностування елементної бази РЕА"; науково-дослідних робіт: №2403 "Розробка автоматизованого комп'ютерного діагностичного комплексу "АККОРД" для розбраковки та діагностування інтегральних схем та інших виробів електронної техніки"; №2530 "Розробка допоміжних програмних та технічних засобів для автоматизованого комп'ютерного діагностичного комплексу "АККОРД", що розширюють його інформаційні можливості"; №2868 "Методи та засоби для аналізу дефектів інтегральних схем при їх виробництві та застосуванні з використанням методології діагностичного моніторингу". Основні результати дисертаційної роботи були використані в ННЦ "ПОЛІТЕК", м. Київ, при розробці засобів діагностичного моніторингу електронної апаратури на об'єктах з підвищеними вимогами безпеки.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на таких семінарах та конференціях:

- республіканській науково-технічній конференції "Исследование и разработка совр. радиоэлектронных элементов и устройств" (Рига, 1989 р.).

- 4-й республіканській науково-технічній конференції "Физические методы диагностики в задачах управления качеством и надежностью. Физика отказов" (Чернівці, 1989 р.);
- науково-технічній конференції "Бытовая радиоэлектронная аппаратура: управление качеством и надежностью" (Одеса, 1990 р.);
- 4-й республіканській науково-технічній конференції "Проблемы нелинейной электротехники" (Київ, 1992 р.);
- науково-технічному семінарі "Дифференциальная спектроскопия изделий микроэлектроники в задачах управления качеством и надежностью" (Київ, 1992 р.);
- III-й міжгалузевій науково-технічній конференції "Надежность и контроль качества изделий электронной техники" (Севастополь, 1993 р.);
- науково-технічній конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми космічних досліджень" (Житомир, 1993 р.);
- школі-семінарі "Автоматизація фізичних методів контролю в технічній діагностиці та медицині" (Славське Львівської обл., 1995 р.);
- Першій Українській науково-практичній конференції "Надежность. Современное состояние. Проблемы. Перспектива" (Київ, 1995 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 12 друкованих праць.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, переліка літератури з 123 позицій та 4 додатків. Основний текст роботи вище 138 сторінок друкованого тексту, 57 рисунків, 9 таблиць.

Зміст роботи.

У вступі обґрунтована актуальність теми, сформульовані ціль та задачі дослідження, визначена новизна одержаних наукових результатів, а також представлені положення, що виносяться на захист.

В першому розділі за результатами аналізу літературних джерел відзначено, що досягнуті рівні надійності сучасних елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління, труднощі їх підтвердження традиційними методами випробувань, а також визначальний вплив на надійність прихованих дефектів, що не виявляються існуючою системою технологічного контролю, зробили необхідними розробку електрофізичних методів та засобів виявлення прихованих дефектів в елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління.

Група електрофізичних методів діагностування елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління за ефектами нелінійності ґрунтується на тому факті, що особливості ФС будь-якого ОД обов'язково відображаються в особливостях функцій відгуку, зареєстрованих експериментально. З такої точки зору в комплексній функції електромагнітної сприйнятливості фізичного середовища ОД $\dot{G}(\bullet)$ можна виділити константну неінформативну та варіаційну інформативну частини.

Інформація про ФС ОД отримується шляхом аналізу його відгуку на зовнішні електромагнітні впливи. Функція відгуку (ФВ) $\Phi(s)$ ОД на зовнішній вплив $s(t)$ може бути описана за допомогою операторного рівняння:

$$\Phi(s) = \dot{G}(\bullet) s(t). \quad (1)$$

Припустимо, що ФВ (1) може за деяких умов бути записаною у вигляді:

$$\Phi(s) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (s(t) - s^*)^n + \frac{d}{dt} \sum_{n=0}^{\infty} b_n (s(t) - s^*)^n, \quad (2)$$

де a_n та b_n – коефіцієнти локальних рядів Тейлора по параметру s , якими апроксимуються відповідно реальна та уявна складові ФВ, з центром розкладу s^* (диференційний спектр). Тоді реальна та уявна частини інформативної варіаційної складової $\dot{G}(s)$ будуть відображатися нелінійними частинами відповідних диференційних спектрів.

$$\dot{G}(s) = \text{con Re} [\dot{G}(s)] + \text{var Re} [\dot{G}(s)] + \text{con Im} [\dot{G}(s)] + \text{var Im} [\dot{G}(s)]$$

$$\Phi(s) = \underbrace{a_0 + a_1 s(t)}_{\text{con Re}} + \underbrace{\sum_{n=2}^{\infty} a_n (s(t) - s^*)^n}_{\text{var Re}} + \frac{d}{dt} \left\{ \underbrace{b_0 + b_1 s(t)}_{\text{con Im}} + \underbrace{\sum_{n=2}^{\infty} b_n (s(t) - s^*)^n}_{\text{var Im}} \right\}$$

За результатами аналізу попередніх робіт відзначено, що найбільші потенційні можливості щодо ефективного використання в задачах діагностування елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління серед методів діагностування за ефектами нелінійності має метод модуляційного диференціювання (ММД) з використанням бігармонічного тестового впливу та реєстрацією фазових характеристик сигналу-відгуку ОД. Цей метод фактично реалізує одночасну реєстрацію залежностей квадратичних коефіцієнтів $a_2(s^*)$ та $b_2(s^*)$ ряду (2) від значення центру розкладу в ряд, які запропоновано називати терміном "аналогова сигнатура нелінійності" – (АСН).

Сукупність залежностей квадратичних коефіцієнтів $a_2(s^*)$ та $b_2(s^*)$ можна розглядати як двовимірну функцію скалярного аргументу – рівню енергетичної активації s^* :

$$a_2(s^*) + j b_2(s^*) = P_2(s^*). \quad (3)$$

Також показано, що фізичний зміст АСН в загальному випадку не може бути безпосередньо витлумачений. З практичної точки зору важливо, що АСН непрямым чином відображає внутрішній фізичний стан ОД, несе діагностичну інформацію, і може бути використаною для розв'язання діагностичних задач. Конкретна фізична інтерпретація АСН можлива за наявності відомостей про внутрішню структуру ОД.

Розглянуті результати експериментальної перевірки гіпотези про діагностичну інформативність АСН ІС. В процесі експерименту була виконана реєстрація АСН ІС K174XA11, розділених на заводі-виробнику на дві групи: 1) ІС, що вміщують мінімальну кількість прихованих дефектів; 2) ІС, що містять дефекти декількох видів, виявлені до герметизації в корпус. За сукупністю АСН ІС першої групи був сформований статистичний еталон АСН ІС даного типу і визначені границі зони надійних бездефектних ІС.

Встановлено, що суттєві відмінності АСН від статистичного еталону спостерігаються у 15% ІС з першої групи та 80% ІС другої групи. Цей факт може розглядатися як підтвердження інформативності АСН щодо поточного фізичного стану ІС.

З метою дослідження можливості прогнозу по АСН потенційної нестабільності ІС для ІС з першої та другої груп обчислювалися коефіцієнти кореляції між відхиленнями АСН від еталонної та показником нестабільності основних функціональних параметрів ІС. Встановлено, що ІС другої групи коефіцієнт кореляції між відхиленнями АСН від еталонної та показником нестабільності функціональних параметрів становив $\rho=0.51$ проти $\rho=0.44$ для всієї сукупності ІС з першої та другої групи.

Зроблено висновок, що результати діагностичного експерименту підтверджують гіпотезу про діагностичну інформативність АСН ІС. Експериментально встановлена можливість виявляти ненадійні ІС з відхиленнями фізичного стану від еталонного, а також показана можливість прогнозування по АСН потенційної стабільності функціональних параметрів ІС.

Також розглянуті результати обчислювального експерименту по математичному моделюванню статичних АСН ІС K155ЛА1, що являє собою базовий елемент TTL-логіки, який проводився з метою попереднього вивчення можливості спостереження по АСН стану фізичного середовища ІС, виявлення прихованих дефектів, фізичної інтерпретації змін в параметрах АСН.

За результатами обчислювального експерименту зроблені такі висновки:

1. встановлена досить висока чутливість АСН до наявності в біполярних ІС прихованих дефектів та процесів їх утворення;
2. АСН найбільш чутливі до змін параметрів ФС активних елементів ІС;
3. при діагностуванні ІС з використанням АСН активні елементи є своєрідними датчиками, чутливими до фізико-хімічних процесів в об'ємі та на поверхні ІС;
4. АСН є практично нечутливими до дефектів металізації між'єднань та виводів, якщо такі дефекти не призвели до виникнення обривів та коротких замикань.

Відзначено, що діагностична інформативність АСН та можливість побудови оперативних та універсальних засобів їх реєстрації дозволяють застосовувати електрофізичні методи діагностування по АСН на різних етапах життєвого циклу ІС – проектування, виробництва, експлуатації для досягнення специфічних цілей:

1. оптимізації структури та параметрів ФС ІС та технології їх виготовлення;
2. вхідного контролю матеріалів, напівфабрикатів та комплектуючих елементів;
3. контролю бездефектності та стабільності технологічних процесів виробництва;
4. розробки готової продукції за рівнем якості та надійності;
5. контролю поточного фізичного стану елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління та її часової стабільності;
6. прогнозування індивідуальної надійності елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління;
7. аналізу причин відмов елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління;
8. пошук місця виникнення несправності в електронній апаратурі.

За кількістю та характером інформації про ОД можна визначити три групи ДМ для використання в процесі електрофізичного діагностування:

1. аналітичні;
2. ймовірно-статистичні;
3. альтернативні.

Аналітичні ДМ вміщують найповнішу інформацію про процеси в фізичному середовищі ОД і можуть бути побудовані на основі детальних відомостей про схемо-технічні, технологічні тощо особливості ОД.

Ймовірно-статистичні ДМ містять інформацію про кореляційні зв'язки параметрів АСН і показників функціонування, надійності та стабільності ОД. Така інформація може бути одержаною за допомогою діагностичного експерименту над реальними зразками ОД конкретного типу.

Альтернативні ДМ ґрунтуються на припущенні про наявність феноменологічного зв'язку між відхиленнями параметрів ФС ОД від нормальних (нормативних) та ступенем якості та надійності ОД. За допомогою альтернативних ДМ можна тільки вказати

на "аномальні" ОД, параметри АСН яких значно відрізняються від нормальних або середніх, але не пояснити причин такої відмінності та їх кількісного виміру.

Проведений аналіз дозволив зробити висновок, що з різновиду можливих груп ДМ (аналітичних, ймовірностно-статистичних та альтернативних) тільки аналітичні дають можливість верифікувати досягнуте розв'язання діагностичної задачі в необхідному обсязі, а саме: визначити вірогідність діагнозу, визначити точність діагнозу; подати фізичну інтерпретацію діагнозу. Вибір тієї чи іншої ДМ в практичних випадках має визначатися вимогами щодо глибини верифікації діагнозу, доступністю відомостей про схемотехнічні та технологічні особливості ОД, наявними часовими та матеріальними ресурсами.

Другий розділ присвячений дослідженню можливостей підвищення точності визначення АСН ОД.

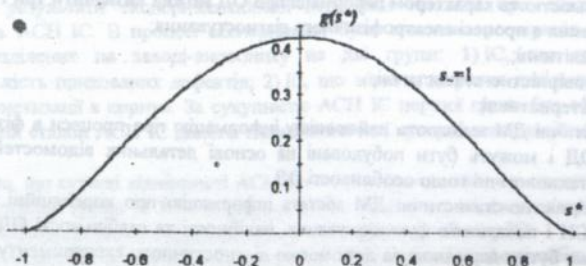
Розглянуті відомі поліноміальні моделі відгуку ОД на моногармонічний ($s(t) = s \sin \Omega t + s^*$) та бігармонічний ($s(t) = s \sin \Omega t + s^* \sin \alpha t + s^*$) тестовий сигнал (ТС).

Відзначено, що метод зменшення методичної похибки визначення АСН, розроблений в рамках поліноміальних моделей відгуку ОД на ТС, який ґрунтується на накладанні обмежень зверху на амплітуду ТС s , при практичній реалізації стикається з обмеженнями інструментального характеру. Мінімальна величина сукупної похибки, що її можна досягти за використання певних інструментальних засобів залежить від характеру ФВ ОД – абсолютних величин та співвідношень між значеннями коефіцієнтів аналітичної моделі ФВ ОД у вигляді локального ряду Тейлора (2). Відзначено, що на практиці для цілого ряду типів ІС зменшення амплітуди ТС s не дає можливості досягти прийнятної величини сукупної похибки визначення АСН.

З метою розробки інтервальної моделі відгуку ОД на ТС проведений теоретичний аналіз, за результатами якого встановлено, що накопичення методичної похибки визначення АСН з використанням моногармонічного ТС може бути описане як згортка аналітичної АСН $P_2(s^*)$ з функцією вікна $g(s^*)$ (Рис. 1):

$$g(s^*) = \begin{cases} \frac{4}{3\pi^2} \left(1 - \frac{s^*}{s}\right)^{3/2}, & |s^*| < s \\ 0, & |s^*| \geq s \end{cases} \quad (4)$$

Рис. 1 Функція вікна згортки для моногармонічного ТС.



Таким чином, інтервальна модель відгуку ОД на ТС описується інтегральним виразом:

$$\hat{P}_2(s^*) = \int_{s^* - \Delta s}^{s^* + \Delta s} P_1(s^* - \zeta) * g(\zeta) d\zeta. \quad (5)$$

де $\hat{P}_2(s^*)$ – АСН, визначена з використанням моногармонічного ТС.

Аналогічні міркування можна використати і в тому випадку, коли для визначення АСН використовується бігармонічний ТС, однак вираз для $g(s^*)$ буде відрізнятися від виразу (4).

Використання інтервальної моделі відгуку ОД на ТС дає можливість визначити обчислювальні співвідношення для зменшення методичної похибки визначення відліків відновленої АСН.

Слід зазначити, що в практичних випадках для визначення АСН необхідно зареєструвати або обчислити сукупність відліків $P_2(s^*)$, що відповідають деяким значенням рівня енергетичної активації s^* . Визначена таким чином сіткова функція інтерполюється за допомогою того чи іншого методу. Результат інтерполяції розглядається як відповідне експериментальне або модельне наближення до АСН ОД.

Нехай аргументи s^*_i відліків сіткової АСН утворюють арифметичну прогресію з прирощенням Δs . Якщо значення амплітуди ТС Δ перевищує крок рівномірної дискретизації Δs , то очевидно, що згідно формули згортки (5) визначене значення відліку сіткової АСН $P_{2,i}$ в точці s^*_i буде залежати не тільки від значення АСН ОД в цій точці, але й від сусідніх значень аналітичної АСН $P_{2,i}$ з індексами $i = -L \dots L$, де $L = \lfloor \Delta s / \Delta s \rfloor$, $P_{2,i}$ – значення АСН в інтервалі $(s_i - \Delta s/2, s_i + \Delta s/2)$:

$$\hat{P}_{2,i} = \sum_{i=-L}^L \gamma_i * P_{2,i}, \quad (6)$$

де γ_i – вагові коефіцієнти. Для їх визначення можна використати формулу згортки (5).

Таким чином, накопичення методичної похибки в процесі визначення сіткової АСН $P_{2,i}$ може бути описане як результат множення відліків дискрет аналітичної АСН $P_{2,i}$ на вектор вагових коефіцієнтів Γ :

$$\hat{P}_{2,i} = \Gamma * P_{2,i}. \quad (7)$$

Показано, що існує і зворотне перетворення:

$$P_{2,i} = \Gamma^{-1} * \hat{P}_{2,i}, \quad (8)$$

яке визначає спосіб розрахунку значень інтерпольованої АСН по відлікам сіткової функції, враховуючи використаний спосіб інтерполяції, вид та параметри ТС.

Отже, зміст запропонованого методу зменшення методичної похибки визначення АСН полягає в тому, що, зменшуючи крок дискретизації Δs при фіксованій амплітуді ТС Δ , можна зменшити до припустимих значень методичну похибку визначення АСН, якщо для обчислення її значень у вузлах інтерполяції використовувати рівняння зворотної дискретної згортки (8). При цьому значення амплітуди ТС Δ можна зробити достатньо великим для зменшення інструментальної похибки визначення АСН.

Не становить принципових труднощів визначення вектору дискретної згортки Γ та зворотної їй Γ^{-1} і у випадку нерівномірної дискретизації АСН.

Оскільки функція вікна згортки для моногармонічного та бігармонічного ТС мають різну форму, це може стати причиною інформаційною несумісності експериментальних

та модельних АСН, що отримуються з використанням ТС різного виду. Для подолання такої інформаційної несумісності може бути використаним один з трьох способів при-
ведення АСН:

$$\begin{aligned} \hat{P}_2^{MOD} &= \Gamma_{MOD} \Gamma_{EXP}^{-1} \hat{P}_2^{EXP}; \\ \hat{P}_2^{EXP} &= \Gamma_{EXP} \Gamma_{MOD}^{-1} \hat{P}_2^{MOD}; \\ P_2 &= \Gamma_{MOD}^{-1} \hat{P}_2^{MOD} = \Gamma_{EXP}^{-1} \hat{P}_2^{EXP}; \end{aligned} \quad (9)$$

де індексами *EXP* та *MOD* позначені відповідно експериментальні та модельні сіткові АСН та матриці коефіцієнтів.

З метою заощадженню витрат на визначення АСН розроблено методику нерівномірної дискретизації АСН в процесі їх інструментальної реєстрації.

Для виконання нерівномірної дискретизації при визначенні АСН необхідно отримувати деяку додаткову інформацію щодо характеру зміни АСН в інтервалі дискретизації. Особливості інструментальної реалізації методу модуляційного диференціювання дозволяють отримувати таку інформацію у вигляді значень коефіцієнтів четвертого ступеню a_4 та b_4 розкладу ФВ в локальний ряд Тейлора (2). Безпосереднім диференціюванням ряду (2) можна показати, що

$$a_4(s^*) + jb_4(s^*) = P_4(s^*) = \frac{1}{12} \frac{\partial^2 P_2(s^*)}{\partial (s^*)^2}. \quad (10)$$

Гранична величина кроку Δs^* при відновленні за допомогою лінійної інтерполяції може бути визначена як функція максимуму модуля похибки відновлення E_1 на інтервалі визначення АСН:

$$\Delta s^* \leq \sqrt{\frac{8(E_1 - \Delta_2)}{M_2}}, \quad (11)$$

де Δ_2 – похибка визначення відліків сіткової АСН $\hat{P}_2(s^*)$, M_2 – максимум модулю $\frac{\partial^2 P_2(s^*)}{\partial (s^*)^2}$ на інтервалі дискретизації.

Величина похибки визначення відліків сіткової АСН Δ_2 може бути оцінена, виходячи з метрологічних характеристик використовуваних засобів реєстрації або моделювання сіткової АСН.

Використовуючи гіпотезу про лінійний характер зміни $\frac{\partial P_2(s^*)}{\partial (s^*)^2}$ всередині інтервалу нерівномірної дискретизації, можна сформулювати правило для перевірки відповідності довжини інтервалу нерівномірної дискретизації характеру зміни $P_2(s^*)$.

$$|s_i^* - s_{i+1}^*| \leq \sqrt{\frac{96(E_1 - \Delta_2)}{\max\{|P_{a_i}|, |P_{a_{i+1}}|\}}}, \quad (12)$$

де s_0 – поточне значення рівня енергетичної активації ОД, E_1 – максимально припустима похибка лінійного відновлення АСН, Δ_2 – похибка визначення відліків АСН, $P_{e,i}$ та $P_{e,i+1}$ – комплексний коефіцієнт нелінійності четвертого ступіню ФВ ОД.

Практична реалізація процедури вибору кроку нерівномірної дискретизації при визначенні АСН виглядає наступним чином:

1. отримати відліки $P_2(s_0^*)$ та $P_e(s_0^*)$. Поклавши $P_e(s_0^*)=0$, використати вираз (12) для знаходження числового значення s_1^* (підгюоз довжини кроку нерівномірної дискретизації),
2. отримати відліки $P_2(s_1^*)$ та $P_e(s_1^*)$. За виразом (12) перевірити відповідність довжини кроку характеру зміни $P_2(s^*)$,
3. якщо довжина кроку відповідає нерівності (12), покласти $s_0^*=s_1^*$ і перейти до пункту 1. В іншому випадку виразом (12) визначити нове значення s_1^* і перейти до пункту 2.

Третій розділ присвячений розробці методики побудови аналітичних ДМ ОД.

Для ефективного використання АСН при організації електрофізичного діагностування діагностична інформація має бути представлена у вигляді, який сприяв би досягненню високої вірогідності діагнозу, скороченню часу його постановки, спрощенню інтерпретації результатів. Очевидно, що в залежності від поставленої діагностичної задачі види представлення інформації можуть відрізнятися. Отже, віднайдення адекватної форми діагностичної інформації неможливе без достатнього аналізу поставленої діагностичної задачі.

Аналіз має ґрунтуватися на методологічному принципі причинно-наслідкових зв'язків між ознаками діагностичної інформації в формі АСН та фізичними факторами в ФС ОД, що викликають появу таких ознак та/або їх зміну. Попередньо на основі апріорної інформації стосовно особливостей відомих технологій виготовлення ІС, характерних умов, факторів та механізмів утворення дефектів та пошкоджень має бути визначена сукупність змін ФС ОД, які можуть в загальному випадку відобразитися в ознаках АСН. Для конкретного типу ОД має бути побудована ПМ, що адекватно відображає функціонування ІС даного типу, та знайдено спосіб відображення змін ФС в її параметрах. Така попередня модель, що відображає основні закономірності функціонування ОД, має бути модифікованою відповідно до схемотехнічних та технологічних особливостей об'єкту дослідження.

Запропонована методика побудови аналітичної ДМ вміщує такі етапи:

1. Збір інформації стосовно схемотехніки ОД, топології, фізичних та електричних параметрів структурних елементів, особливостей технології виготовлення.
2. Аналіз характерних умов, факторів та механізмів утворення дефектів та пошкоджень, що можуть впливати на ФС ОД на протязі процесу виготовлення та експлуатації.
3. Знайдення способів відображення факторів та механізмів утворення дефектів та пошкоджень в параметрах ФС ОД.
4. Побудова та налагодження адекватної ПМ.
5. Визначення сукупності АСН, що достатньо повно характеризує можливі зміни ФС ОД.
6. Побудова вирішальних правил для оцінки параметрів ФС ОД за визначеними АСН.

В результаті проведеного аналізу літературних джерел визначені основні фактори та механізми, що призводять до виникнення дефектів та пошкоджень структурних елементів ІС. Визначені характерні зміни у параметрах ФС типових структурних елементів ІС, що виникають в результаті дії деградційних та пошкоджуючих факторів.

За основу для побудови розрахункових моделей ІС вибрані електричні еквівалентні моделі структурних елементів. В необхідних випадках для ідентифікації електричних параметрів еквівалентних моделей а також для визначення способу адекватного відображення в цих параметрах змін ФС можуть використовуватися структурно-фізичні та фізико-топологічні моделі структурних елементів ІС.

Таким чином, значення параметрів електричних еквівалентних моделей структурних елементів ІС можуть розглядатися як характеристики ФС ІС, а сукупність параметрів моделей всіх структурних елементів ІС складатиме вектор параметрів моделі ОД.

Проведено практичну перевірку ефективності запропонованої методики побудови аналітичних ДМ ІС на прикладі розв'язання задачі аналізу зміни параметрів ФС каналу передачі цифрового сигналу ІС 1834ВА86.

Четвертий розділ присвячений розробці методики обчислення відгуку ПМ ІС на тестовий сигнал.

Узагальнену модель структурного елемента ІС можна представити у вигляді L -полюсника, з характерними для кожного типу компонентів явними диференціально-алгебраїчними залежностями струмів в виводах від потенціалів на виводах:

$$i_l = \psi(\varphi_1, \dots, \varphi_L), \quad \forall l \in [1, L], \quad (16)$$

де i_l – струм, що протікає через l -тий вивід ЕС, φ_l – потенціал на l -тому виводі. Враховуючи це, запропоновано для обчислення реакції ПМ ІС на зовнішній вплив використовувати вузловий метод.

Розглянуті можливі варіанти реалізації методу обчислення відгуку ПМ ОД за умови використання моногармонічного ТС. Зазначено, що під впливом такого ТС в ОД після закінчення перехідних процесів встановлюються періодичні коливання усталеного режиму. Квадратичні коефіцієнти поліному (2) є пропорційними амплітуді A_1 та B_2 гармонічних складових відгуку в усталеному режимі з частотою 2ω .

Методи розрахунку параметрів періодичних коливань в усталеному режимі можна розділити на дві групи:

1. методи, в яких здійснюється підбір початкових умов інтегрування;
2. методи, оснований на алгебраїзації ПМ за допомогою операційних перетворень.

Основною перевагою методу моделювання шляхом підбору початкових умов є відносна простота його реалізації. Недоліками є велика кількість необхідних для реалізації математичних операцій (пропорційна четвертому ступеню розмірності ПМ) та утруднення при контролі похибки обчислень.

Зважаючи на те, що в усталеному динамічному режимі всі електричні процеси в ОД є періодичними функціями часу, розглянуті особливості методів алгебраїзації ПМ за допомогою представлення функцій часу у вигляді часткових сум ряду Фур'є та диференціально-тейлорівського (ДТ) перетворення:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{t-t_0}{H} \right)^k X(k) \quad \hat{=} \quad X(k) = \frac{H^k}{k!} \left(\frac{\partial^k x(t)}{\partial t^k} \right) \Big|_{t=t_0}, \quad (17)$$

згідно якому оригінал $x(t)$ – фізична величина, що є функцією часу, може бути представлений у вигляді диференціального спектру $X(k)$ – функції цілочисельної змінної $k = \overline{1, \infty}$.

За результатами проведеного аналізу встановлено, що основною перевагою методів алгебраїзації ПМ з використанням гармонічних поліномів та ДТ-спектрів є можливість аналітичного обчислення елементів якобіву алгебраїзованої моделі за відоми-

ми моделями структурних елементів ІС, що дає можливість значно скоротити обчислювальну ціну реалізації цих методів.

Показано, що цінною властивістю розглянутих методів є також можливість з процесі обчислень оцінювати величину похибки, що виникає внаслідок обмеження кількості гармонічних складових або довжини ДТ-спектру. Наведені обчислювальні співвідношення, які можуть бути використані для контролю накопичення методичної похибки в процесі обчислень.

Основні розбіжності між інтегральними та диференціальними перетвореннями виявляються при побудові математичних моделей нелінійних компонент ПМ в області зображень. Для прикладу розглянемо функцію, що є часткою від ділення двох інших:

$$z(t) = \frac{x(t)}{y(t)} \quad (18)$$

В області зображень компоненти ДТ-спектру обчислюються за рекурентною формулою:

$$Z(k) = \frac{X(k) - \sum_{l=0}^{k-1} Z(l)Y(k-l)}{Y(0)} \quad (19)$$

тобто для обчислення зображення $Z(k)$ необхідно виконати $\sim 5^2 \sim 25$ операцій.

Знаходження коефіцієнтів гармонічного поліному вимагає розв'язання системи алгебраїчних рівнянь 5-го порядку:

$$\begin{bmatrix} x_{-2} \\ x_{-1} \\ x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_0 & y_{-1} & y_{-2} & 0 & 0 \\ y_1 & y_0 & y_{-1} & y_{-2} & 0 \\ y_2 & y_1 & y_0 & y_{-1} & y_{-2} \\ 0 & y_2 & y_1 & y_0 & y_{-1} \\ 0 & 0 & y_2 & y_1 & y_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_{-2} \\ z_{-1} \\ z_0 \\ z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Отже, обчислення зображення $Z(k)$ буде пов'язане з виконанням $\sim 5^3 \sim 125$ операцій.

Аналогічно, але менш наочно, можна показати, що знаходження зображення функції $y = e^x$ у вигляді ДТ-спектру теж зводиться до рекурентної формули, а знаходження коефіцієнтів гармонічного поліному вимагає розв'язання системи алгебраїчних рівнянь. Цей факт має особливе значення з огляду на повсюдне використання експоненціальних функцій в моделях компонент ІС.

Таким чином, можна зробити висновок про доцільність використання диференційно-спектрального операційного перетворення для алгебраїзації ПМ ОД внаслідок значно нижчої (порівняно з перетворенням Фур'є) вартості обчислення зображень нелінійних характеристик.

Також розглянуті питання, що стосуються практичної реалізації методики обчислення відгуку ПМ за допомогою ДТ-спектрів

За допомогою аналітичних досліджень визначені розрахункові співвідношення для обчислення коефіцієнтів $a_1(s^*)$ та $b_1(s^*)$ за значеннями амплітуд гармонічних складових коливань, що встановлюються в ОД в усталеному динамічному режимі

Для знаходження виразу для аналітичного обчислення елементів якобіану алгебраїзованої ПМ за виразами для відповідних часткових похідних в області оригіналів випишемо формулу для часткової похідної s -того струму по k -тій напрузі:

$$\frac{\partial i_s}{\partial u_k} = v_1(t) + \frac{d}{dt} v_2(t). \quad (21)$$

Розглянемо формулу для диференціалів:

$$\Delta i_s = \frac{\partial i_s}{\partial u_k} \Delta u_k = v_1(t) \Delta u_k + \frac{d}{dt} (v_2(t) \Delta u_k) \\ \underline{\Delta i_s(k)} = Y_1(k) * \Delta U_s(k) + \mathcal{D}(Y_2(k) * \Delta U_s(k)) \quad (22)$$

Розписавши її за правилами виконання операції Т-множення, маємо матричне рівняння:

$$\begin{bmatrix} \Delta U(0) \\ \Delta U(1) \\ \Delta U(2) \\ \Delta U(3) \\ \Delta U(4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1(0) + \frac{Y_2(1)}{H} & \frac{Y_2(0)}{H} & 0 & 0 & 0 \\ Y_1(1) + \frac{2Y_2(2)}{H} & Y_1(0) + \frac{2Y_2(1)}{H} & \frac{2Y_2(0)}{H} & 0 & 0 \\ Y_1(2) + \frac{3Y_2(3)}{H} & Y_1(1) + \frac{3Y_2(2)}{H} & Y_1(0) + \frac{3Y_2(1)}{H} & \frac{3Y_2(0)}{H} & 0 \\ Y_1(3) + \frac{4Y_2(4)}{H} & Y_1(2) + \frac{4Y_2(3)}{H} & Y_1(1) + \frac{4Y_2(2)}{H} & Y_1(0) + \frac{4Y_2(1)}{H} & \frac{4Y_2(0)}{H} \\ Y_1(4) & Y_1(3) & Y_1(2) & Y_1(1) & Y_1(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U(0) \\ \Delta U(1) \\ \Delta U(2) \\ \Delta U(3) \\ \Delta U(4) \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\Delta U(k) = B * \Delta U(k).$$

з якого очевидний спосіб аналітичного обчислення елементів матриці часткових похідних.

ДТ-моделі компонентів ПМ можуть бути побудовані на базі відомих аналітичних моделей в часовій області за допомогою формальної заміни математичних операцій над функціями часу операціями над відповідними ним ДТ-спектрами.

У випадку, коли вихідні моделі компонент задані в табличному або кусочно-поліноміальному вигляді безпосередньо використати ДТ-перетворення для визначення зображень заданих у такому вигляді моделей, очевидно, неможливо. Одним із шляхів розв'язання цієї задачі є апроксимація таких моделей функціями, що мають ДТ-зображення.

В заключних висновках сформульовані основні результати, визначені при виконанні дисертаційної роботи.

В додатки винесені таблицю з результатами обчислювального експерименту по моделюванню статичних АСН ІС К155ЛА1, а також вихідні тексти програмних засобів, розроблених за результатами виконання дисертаційної роботи.

Основні результати та висновки.

За результатами дослідження шляхів підвищення точності та ефективності інструментальних засобів отримання діагностичної інформації про фізичний та технічний стан елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління, і зокрема ІС, та вивчення можливостей побудови аналітичних діагностичних моделей ІС та їх використання при організації електрофізичного діагностування за ефектами нелінійності зроблені такі висновки.

1. Проведені дослідження дозволили показати, що аналогові сигнатури нелінійності елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління, і зокрема ІС, є достатньо інформативною формою представлення інформації про перебіг електрофізичних процесів, які відбуваються в об'єкті діагностування під впливом прикладеної енергетичної активації. Експериментально та теоретично підтверджена висока чутливість аналогових сигнатур нелінійності до параметрів фізичного середовища інтегральних схем. Зроблено висновок про можливість розв'язання за їх допомогою широкого спектру діагностичних задач.
2. За результатами теоретичних досліджень запропоновані інтервальні моделі відгуку елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління на тестовий сигнал. На базі інтервальних моделей розроблено метод зменшення методичної похибки визначення аналогових сигнатур нелінійності та метод подолання інформаційної несумісності зареєстрованих інструментально аналогових сигнатур нелінійності реальних об'єктів діагностування і аналогових сигнатур нелінійності, визначених за допомогою моделювання відгуку параметричної моделі цих об'єктів.
3. Розроблено методику нерівномірної дискретизації аналогових сигнатур нелінійності в процесі їх інструментальної реєстрації, яка сприяє заощадженню витрат на визначення аналогових сигнатур нелінійності елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління за рахунок скорочення загальної кількості точок дискретизації. За допомогою обчислювального експерименту продемонстровано високу ефективність запропонованої методики.
4. Визначено, що параметричні моделі інтегральних схем дозволяють пропонувати аналітичні методи створення діагностичних моделей по аналоговим сигнатурам нелінійності інтегральних схем. Запропоновано методику побудови аналітичної діагностичної моделі інтегральної схеми. Вибрано спосіб побудови параметричної моделі інтегральної схеми та відображення змін фізичного стану інтегральної схеми в її параметрах, що ґрунтується на фізичних законах функціонування структурних компонентів інтегральних схем.
5. Результати проведених досліджень дозволили розробити методику обчислення відгуку параметричної моделі інтегральної схеми на тестовий сигнал, що ґрунтується на алгебраїзації диференційно-алгебраїчної моделі інтегральної схеми за допомогою диференційно-тейлорівських спектрів функцій часу.
6. На основі виконаних досліджень створені програмні засоби для обчислення аналогових сигнатур нелінійності, які можуть бути використані при розробці засобів електрофізичного діагностування за ефектами нелінійності.

Публікації по темі дисертаційної роботи

1. Усатенко В.Г., Шерстюк І.В., Миненко А.П., Свистунов А.Я. Метод и средства диагностирования электрорадиодеталей по интегральным электрофизическим эффектам // Тез. докл. Респ. научн.-техн. конф. "Исследование и разработка совр. радиомикроэлектронных элементов и устройств". – Рига, 1989. – с. 31.
Автором розроблено вимірювальний тракт установки для реєстрації параметрів нелінійності електрорадіовиробів.
2. Усатенко В.Г., Сердюк Г.Б., Свистунов А.Я., Миненко А.П., Кононенко А.Д. Система построения решающих правил при диагностировании интегральных микросхем по нелинейности энергопотребления. Тез. докл. конф. "Бытовая ра-

диоэлектронная аппаратура: управление качеством и надежностью". – Одесса, 1990. – с. 59-61.

Автором показана можливість ефективного використання побудованих вирішальних правил для визначення виду технічного стану об'єкту діагностування.

3. Сердюк Г.Б., Усатенко В.Г., Миненко А.П. Автоматизированный комплекс для электрофизического диагностирования интегральных схем и других изделий электронной техники по критериям качества и надежности. – Киев: КПИ, НПП АМАТЕК, 1992. – 63 с.

Автором розроблені програмні засоби керування діагностичним експериментом та прийняття діагностичного рішення.

4. Усатенко В.Г., Сердюк Г.Б., Сазонов С.Н., Миненко А.П. Прогнозирование технического состояния интегральных микросхем по характеристикам нелинейности энергопотребления. Тез. докл. научно-техн. семинара "Дифференциальная спектроскопия изделий микроэлектроники в задачах управления качеством и надежностью". – Киев: РДНТП, 1992. – с. 24-25.

Автором встановлена наявність регресійних зв'язків між параметрами сигнатур нелінійності та показниками стабільності ІС.

5. Сердюк Г.Б., Усатенко В.Г., Миненко А.П., Свистунов А.Я. Архитектура и информационные возможности комплексов электрофизического диагностирования ИЭТ нового поколения. Тез. докл. научно-техн. семинара "Дифференциальная спектроскопия изделий микроэлектроники в задачах управления качеством и надежностью". – Киев: РДНТП, 1992. – с. 24-25.

Автором запропоновано використовувати нерівномірну дискретизацію для збільшення точності та зменшення часу реєстрації сигнатур нелінійності.

6. Усатенко В.Г., Сердюк Г.Б., Миненко А.П. Моделирование характеристик нелинейности энергопотребления ИМС как носителей диагностической информации. // Тез. докл. 4-й Респ. научн.-техн. конф. "Проблемы нелинейной электротехники". – Киев, 1992. – с. 137-138

Автором запропонована методика побудови параметричної моделі ІС та способи відображення змін фізичного стану ІС в параметрах моделі.

7. Сердюк Г.Б., Усатенко В.Г., Миненко А.П. Характеристики нелинейности энергопотребления интегральных микросхем как носители диагностической информации и их моделирование. Тез. докл. III-й межотр. научн.-техн. конф. "Надежность и контроль качества изделий электронной техники" – Севастополь, 1993. – с. 23-25

Автором запропоновано алгоритми побудови вирішальних правил та прийняття діагностичного рішення про вид технічного стану об'єкту діагностування.

8. Миненко А.П., Свистунов А.Я., Пешкина Г.П. Компьютерные комплексы для дифференциальной спектроскопии элементной базы РЭА. // Тез. докл. научн.-техн. конф. "Фундаментальные и прикладные проблемы космических исследований" – Житомир, 1993. – с. 128-129

Автором розроблені апаратні та програмні засоби реєстрації первинної діагностичної інформації та запропонований спосіб попередньої обробки інформації з метою зменшення похибки реєстрації.

9. Усатенко В.Г., Сердюк Г.Б., Миненко А.П. Характеристики нелинейности энергопотребления интегральных микросхем как носители диагностической информации и их моделирование // Электрон. моделирование. – 1994. – №2 – с. 48-55
Автором проаналізовано інформативність сигнатур нелінійності щодо виявлення в ІС прихованих дефектів різних видів.
10. Миненко О.П., Моторний Ю.М. Модели шумовых дефектов та процесів їх утворення в ІС КМОН у базисі динамічних характеристик нелінійності. Тези доповідей школи-семінару "Автоматизация физических методов контроля в технической диагностике та медицині. Київ: УБЕНТЗ, 1995. - с. 21-22
Автором запропоновано методуку побудови діагностичних моделей КМОН ІС та фізичної інтерпретації ознак сигнатур нелінійності.
11. Усатенко В.Г., Сердюк Г.Б., Миненко А.П. Проблемы мониторинга электронной аппаратуры на объектах с повышенными требованиями безопасности и пути их решения. Тезисы доклада Первой Украинской научно-практической конференции "Надежность. Современное состояние. Проблемы. Перспектива". – Киев.: Ин-т автоматки, 1995. – с. 36-37.
Автором запропоновано методуку визначення інформативних параметрів сигнатур нелінійності КМОН ІС, що відображають часові зміни фізичного стану об'єктів діагностування.
12. Миненко А.П., Сердюк Г.Б., Усатенко В.Г. Использование дифференциальных спектров в задачах моделирования динамических характеристик нелинейности изделий электронной техники. Тезисы доклада Первой Украинской научно-практической конференции "Надежность. Современное состояние. Проблемы. Перспектива". – Киев.: Ин-т автоматки, 1995. – с. 47.
Автором запропоновано використовувати диференціальні спектри для обчислення відгуку параметричної моделі об'єкта діагностування на тестовий сигнал, а також розроблені відповідні диференційно-спектральні моделі компонент ІС.

Аннотация.

Миненко Александр Петрович

Аналоговые сигнатуры нелинейности и диагностические модели интегральных схем.

Рукопись диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.08 "Вычислительные машины, системы и сети, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления".

Национальный технический университет Украины "КПИ", г. Киев, 1996 г.

Целью диссертационной работы является исследование путей повышения точности и эффективности инструментальных средств получения диагностической информации о физическом и техническом состоянии элементов и устройств вычислительной техники и систем управления, в частности ИС, изучение возможностей построения аналитических диагностических моделей ИС, а также их использования при организации электрофизического диагностирования по эффектам нелинейности. В работе проанализированы информационные особенности аналоговых сигнатур нелинейности элементов и устройств вычислительной техники и систем управления. На базе предложенных автором интервальных моделей отклика объекта диагностирования на тестовый сигнал разработан метод уменьшения методической погрешности получения сигнатур нелинейности. Предложена методика неравномерной дискретизации сигнатур нелинейности в процессе регистрации, которая обеспечивает значительную экономию необходимых для этого ресурсов. Разработана методика построения аналитических диагностических моделей ИС, пригодных для верификации результатов диагностирования, а также рассмотрен ряд вопросов, связанных с ее практической реализацией.

Abstract.

Minenko Alexander

Analog signatures of nonlinearity and diagnostic models of integrated circuits.

Doctor thesis on speciality 05.13.08 "Computing machines, systems and networks, elements and units of computing and control systems"

National technical university of Ukraine "KPI", Kyiv, 1996.

The aim of the thesis is to find out the way to increase tolerance and efficiency of the instrumental means for gathering diagnostic information about physical and technical state of the elements and units of computing and control systems, to explore possibilities to create and utilize the analytical diagnostic models of ICs. The information features of analog signature of nonlinearity of electronic components and units is analyzed. The approach of reducing methodical error of signature evaluation is proposed. The author offer the method of nonuniform sampling during signature evaluation features significant cuts resources needed. Also the method of creation of analytical diagnostic models of ICs which can be used for diagnosis verification is developed and practical aspects of its utilization is discussed.

Ключові слова: електрофізичне діагностування, елементи та пристрої обчислювальної техніки та систем управління, сигнатура нелінійності, діагностична модель.

КОС, 1996 р.
Замов.-422 тир.-90

120/01

AB 35.549