

На правах рукопису

ПДЛИПНИЙ ЮРІЙ Васильович



УДК 621.382

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ, МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ДІАГНОСТИКИ  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ІС

Спеціальність: 05.13.05 - Системи автоматизації проектувань

А в т о р е ф е р а т  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

ЛЬВІВ - 1996

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі "Системи автоматизованого проектування" Державного університету "Львівська політехніка"

Науковий керівник : доктор технічних наук, професор  
В.О.Коваль

Науковий консультант : доктор технічних наук, професор  
Ю.О.Долгов

Офіційні опоненти : доктор технічних наук, професор  
Недоступ Леонід Аврамович,  
кандидат технічних наук  
Смеркло Любомир Михайлович

Провідне підприємство : СКТБ "Оризон", м. Івано-Франківськ

Захист відбудеться " 9 " жовтня 1996 року о 14 годині  
на засіданні спеціалізованої ради КО4.06.06 при Державному  
університеті "Львівська політехніка" за адресою :  
290646 , м.Львів-ІЗ, вул. С.Бандери, ІЗ.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній  
бібліотеці Державного університету "Львівська політехніка" за  
адресою : 290646 , м. Львів-ІЗ, вул. Професорська, І.

Автореферат розісланий " 5 " вересня 1996 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради  
к.т.н.



С.П.Ткаченко

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00759978 (2)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність проблеми.

Розвиток мікроелектроніки забезпечується розробкою та неперервним вдосконаленням як методів проектування напівпровідникових ІС, так і технологічних процесів їх виготовлення шляхом створення та використання сучасних засобів комп'ютерних систем проектування (САПР). Такі системи повинні забезпечувати оптимальні конструкторсько-технологічні рішення об'єктів проектування для ефективною адаптації їх у середовищі типового технологічного базису.

За традицією засоби машинного проектування (САПр) орієнтовані на створення номінальних проектів ІС, тобто таких проектів, які відповідають номінальним значенням параметрів згідно технічного завдання. Однак реальному циклу створення нових виробів властиві випадкові і невідповідні порушення (збурення), непрогнозовані величини амплітуд котрих і призводять до браку. Наявність випадковості визначає статистичну природу параметрів об'єкту проектування і виготовлення. Для підвищення проценту виходу придатних ІС номінальний проект разом з технологічним процесом часто змінюється. Ці зміни здійснюються як в процесі налагодження виробництва (на етапі установочних партій), так і в процесі масового виробництва і дозволяють покращити технологічність пристрою.

Сучасні приладо-технологічні САПР повинні вирішувати задачу моделювання і аналізу взаємозв'язку між параметрами порушень (збурень) технологічного процесу, функціональними та конструктивними параметрами об'єкту проектування. Тільки при такому комплексному підході можна отримати максимальний технологічний вихід придатних, а значить і максимальний прибуток при заданому рівні якісних характеристик. При цьому особлива увага приділяється задачам ідентифікації збурень технологічного процесу, моделювання та діагностування параметрів ідентифікованих збурень виробничого циклу. Всі вони є основними складовими процесу діагностики виробу і повинні бути об'єднані в інтегровану процедуру: технологічний процес-пристрій-схема-система. Така послідовно-ітераційна процедура забезпечує необхідний рівень технологічності проекту і вказане об'єднання є основою для майбутніх програмних систем діагностики як складових САПР мікроелектроніки.

Процес розробки програмного забезпечення систем автоматизо-

ваного проектування є складним, тому при його створенні необхідно орієнтуватися на прогресивні технології розробки та існуючі інструментальні засоби їх підтримки, які включають інтерфейси з різного роду накопичувачами інформації. А найбільш перспективний шлях вирішення задач діагностики - використання для її цілей пасивної контрольної-виміральної інформації з різних рівнів проходження технологічного процесу.

Слід зазначити, що для діагностики технологічних процесів виготовлення ІС необхідна нова систематизація технологічного процесу і класифікація браку та причин його появи, які забезпечать можливість ідентифікації збурень технологічного процесу на фоні формуючих дій цього процесу. Це тісно пов'язано з моделями та методами аналізу результатів формуючих дій (показників якості) і збурень технологічного процесу. Крім того, головна задача діагностики технологічних процесів - розробка методів і принципів побудови математичних моделей, які зв'язують параметри збурень і показники якості об'єкту діагностики. Тому проблема побудови системи діагностування вимагає рішення задач розробки нових моделей і методів аналізу систем як об'єктів діагностики та розробки методів побудови моделей об'єктів діагностики і їх алгоритмізації.

Метою дисертаційної роботи є розробка статистичних моделей, методів та алгоритмів діагностики технологічних процесів і створення прикладного програмного забезпечення САПР мікроелектроніки для підвищення рівня виходу придатних і зменшення собівартості мікроелектронних пристроїв.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі :

1. Провести систематизацію технологічного процесу виготовлення ІС, класифікацію браку і причини його появи з метою визначення етапів та рівнів проведення контрольної-діагностичних операцій для забезпечення необхідної глибини та достовірності діагностування.
2. Розробити алгоритми діагностики технологічного процесу, які забезпечують послідовний аналіз процесу формування виробу, локалізацію області появи збурень, визначення причин зміщення технологічного маршруту на етапах формування напівпровідникового кристалу.
3. Розробити, дослідити та реалізувати моделі оцінки точності та стабільності технологічного процесу, що дозвлять здійснити роз-

шарування процесу виготовлення для визначення нестабільних технологічних операцій та зовнішніх впливів.

4. Розробити методи та алгоритми побудови математичних моделей об'єкту діагностики, які використовують результати пасивних експериментальних досліджень і дозволяють зв'язати технологічні параметри з контрольованими характеристиками пристроїв.

5. Розробити, дослідити та реалізувати математичні моделі діагностики технологічного процесу виготовлення ІС з метою визначення причин збурень процесу виготовлення на всіх рівнях виробничого контролю.

6. Створити програмно-методичний комплекс діагностики технологічного процесу як складової приладо-технологічної САПР ІС на базі розробленого інформаційного, математичного та програмного забезпечення.

Методи досліджень - методи системного аналізу, фізики напівпровідників та фізики твердого тіла, математичний апарат статистики, теорії ймовірності, математичного моделювання, а також методи прикладного і системного програмування.

На захист виносяться такі положення :

1. Систематизація технологічного процесу виготовлення ІС, яка показує послідовність формування напівпровідникового пристрою, впливи зовнішніх та внутрішніх факторів в реальному виробництві, послідовно-ієрархічну структуру контрольно-діагностичних операцій, що дає змогу визначити етапи рішення задач діагностики.

2. Класифікація браку та причин його появи, яка відображає збурення процесу виробництва ІС, дефекти напівпровідникового пристрою, а також визначає задачі та методи діагностики як в процесі проектування ІС, так і при їх виготовленні.

3. Математичні моделі оцінки точності і стабільності технологічного процесу, які дають можливість виявляти збурюючі фактори технологічного процесу за результатами розширеного експерименту.

4. Методика локалізації області появи збурень, реалізована в вигляді таблиць експрес-аналізу, яка за результатами оцінки точності і стабільності технологічного процесу дозволяє виявити основні причини браку.

5. Методи побудови регресійних моделей за результатами пасивної контрольно-виміральної інформації, які відповідають статистичній чутливості реального технологічного процесу, що дає можливість

проводити діагностику параметричного браку.

6. Програмно-методичний комплекс аналізу контрольної-виміральної інформації з різних етапів проходження технологічних процесів та діагностики технологічних процесів виготовлення ІС, побудований за модульним принципом організації програмного забезпечення.

Наукова новизна роботи :

- проведена систематизація технологічного процесу виробництва ІС на основі раціональної послідовності операцій формування напівпровідникових пристроїв, яка дозволяє виявити впливи внутрішніх та зовнішніх факторів в реальному виробництві, сформувати послідовно-ієрархічну структуру контрольної-діагностичних операцій та етапів рішення задач діагностики;

- запропонована і проведена класифікація браку та причин його появи в виробничому процесі, що дає можливість визначити задачі та методи діагностики як в процесі проектування ІС, так і при їх виробництві;

- розроблені, досліджені і реалізовані математичні моделі оцінки точності і стабільності технологічного процесу виготовлення ІС, визначені граничні значення коефіцієнтів моделей для серії, партії та окремих пластин;

- розроблена і реалізована методика побудови тестових таблиць проведення експрес-аналізу з метов локалізації області появи збурень в технологічному процесі виготовлення ІС, що дозволяє за результатами виробничого контролю виявити основні причини браку і розділити їх на впливи гігієни виробництва, процеси в обладнанні, зміщення технологічного маршруту, стану напівпровідникових пластин та якості матеріалів для конкретної технологічної операції;

- модифіковані методи побудови регресійних моделей за пасивними експериментальними даними в умовах неортогональності і несиметричності планів, порушення вимог гомоскедастичності, які відповідають статистич. й чутливості реального виробничого процесу, що дає можливість проводити діагностику параметричного браку.

Практична цінність роботи :

1. Проведена систематизація технологічного процесу виробництва ІС і класифікація браку та причин його появи в виробничому процесі, що дозволяє представити технологічний процес, як об'єкт діагностики

2. Розроблена методика локалізації області збурень в технологіч-

ному процесі виготовлення ІС за результатами виробничого контролю, що дає можливість виявляти основні групи причин нестабільного виходу придатних виробів.

3. На основі ієрархічного використання формалізованих математичних моделей об'єкту діагностики, розроблений алгоритм діагностики технологічного процесу виготовлення ІС, який дозволяє визначити причини параметричного браку на всіх рівнях і етапах проходження виробничого процесу.

4. Розроблена структура та реалізований програмно-методичний комплекс, побудований за модульними принципами організації програмного забезпечення, який за результатами вимірювань з різних рівнів контролю формує інформаційну модель об'єкту діагностики, здійснює аналіз та здійснює побудову регресійних моделей і діагностику складових цієї інформаційної моделі.

#### Реалізація результатів роботи.

Теоретичні і практичні результати роботи впроваджені на АТ "Родон" (м. Івано-Франківськ), а також в учбовий процес кафедри САПР Державного університету "Львівська політехніка" в курсах: "Інтегровані САПР великих інтегральних схем" і "Автоматизовані системи технологічної підготовки виробництва" та при проведенні дипломного проектування.

#### Апробація роботи.

Робота в цілому та її окремі результати доповідалися і обговорювалися на науково-технічних конференціях та семінарах:

II та III Міжнародних науково-технічних конференціях "Досвід розробки і застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці" (Львів, 1993, 1995р.р.); Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні проблеми автоматизованої розробки і виробництва радіоелектронних засобів та підготовки інженерних кадрів" (Львів, 1994р.); Міжнародній науково-технічній конференції "Машинное моделирование и обеспечение надежности электронных устройств" (Воронеж, 1993 р.); науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Державного університету "Львівська політехніка" (1993-1996р.р.).

В повному обсязі дисертаційна робота доповідалась на кафедрі "Системи автоматизованого проектування" Державного університету "Львівська політехніка".

Публікації. Основні положення і результати дисертаційної роботи відображені в десяти друкованих працях.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота займає 135 сторінок машинописного тексту і складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури. Робота містить 25 рисунки, 14 таблиць. Бібліографічний список складається із 135 назв.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі викладена загальна характеристика роботи, обгрунтована її актуальність, сформульована мета і основні задачі досліджень, визначені методи найбільш перспективного вирішення сформульованих задач, сформульована наукова новизна роботи і положення, що виносяться на захист, а також короткий зміст роботи.

В першому розділі проведений аналіз задач діагностики в процесі проектування та виробництва ІС, визначена додаткова мета проектування, яка полягає в досягненні високого рівня технологічності виробів. Сформульовані основні фази розробки напівпровідникових пристроїв, показані можливі задачі та методи діагностики на всіх фазах від вибору стратегії розробки до масового виробництва продукції з метою забезпечення високого і стійкого проценту виходу придатних ІС.

Проведено систематизацію технологічних операцій згідно функціонального призначення, етапів формування ІС, рівнів проведення контрольно-діагностичних операцій. Визначено особливості дії зовнішніх впливів на технологічний процес, а також послідовність зміни характеристик напівпровідникового пристрою.

Запропонована і проведена класифікація браку та причин його появи, яка дозволяє систематизувати характеристики контролю, виділити рівні відмов, деформації в напівпровідникових кристалах і збурення в процесі виготовлення. Сформульовані поняття ідеальної ІС, браку, деформації, дефекту, збурення та стану пластин; наведена ієрархічна класифікація, яка дає можливість послідовно вирішувати задачі діагностики як в процесі проектування пристроїв, так і при їх виготовленні.

Проведена систематизація технологічного процесу та класифікація браку дозволили розробити алгоритм діагностики згідно всіх рівнів контролю (операційного, міжопераційного, заключного та

функціонального) та поетапного і послідовного аналізу процесу формування кристалів. Особливістю цього алгоритму є оцінка інформаційної місткості об'єкту контролю, аналіз ефективності використання результатів контролю, оцінка точності і стабільності процесу, розширення технологічного процесу в часі і просторі та проведення експрес-аналізу локалізації області появи збурень. У випадку появи параметричного браку такий підхід дозволяє будувати ефективні моделі і на їх основі проводити діагностику.

Другий розділ дисертації присвячений розробці моделей дисперсійного аналізу результатів виробничого контролю і проведення попереднього діагностування виробничого циклу з метою локалізації області появи збурень в технологічному процесі.

На основі інформаційного підходу розроблена оцінка інформаційної ємності об'єкту контролю як складної системи для побудови математичних моделей і на їх основі діагностики виробничого процесу. Вона вказує на необхідність визначення оптимальної сукупності факторів, які найбільше впливають на показники якості виробу, щоб в умовах мінімального набору вихідної інформації можна було забезпечувати максимально можливу глибину діагностування.

Запропоновано підхід розділення (розширення) дисперсій тиражу параметрів  $\sigma_T$  на дисперсії постійно-впливачі на партії пластин і окремі пластини (дисперсії неоднорідності -  $\sigma_{н.п.}$ ,  $\sigma_{н.пл.}$ ) та вибірково-впливачі (дисперсії стабільності -  $\sigma_{с.п.}$ ,  $\sigma_{с.пл.}$  відповідно). Тоді:

$$\sigma_T^2 = \sigma_{с.п.}^2 + \sigma_{н.п.}^2 \quad \text{а} \quad \sigma_{н.п.}^2 = \sigma_{с.пл.}^2 + \sigma_{н.пл.}^2 \quad (1)$$

Таке розширення на основі результатів пасивних експериментів дозволяє розробити показники оцінки точності і стабільності тиражу, партії та окремих пластин:

$$K_{т.т} = \frac{T_B - T_H - 2 \left| \bar{Y} - \frac{1}{2} (T_B + T_H) \right|}{2 \sigma_T} \quad (2)$$

а якщо норма має тільки верхню  $T_B$  або тільки нижню  $T_H$  границю, то вираз приймає вигляд:

$$K_{т.т} = \frac{|T_B - \bar{Y}|}{2 \sigma_T} \quad (3)$$

де:  $\bar{Y}$  - центр розподілу тиражу;  $\sigma_T$  - середня квадратична похибка розподілу тиражу;  $z$  - квантиль імовірності  $P_0$ ;  $P_0$  - встановлений (бажаний) відсоток виходу придатних при економічно обґрунтованій степені близькості дійсних та номінальних значень параметрів виробів.

Аналогічно для партії показник точності дорівнює:

$$K_{т.п} = \frac{T_B - T_H - 2 \left| \bar{Y} - \frac{1}{2} (T_B + T_H) \right|}{2 z \sigma_{н.п.}} ; \quad (4)$$

$$K_{т.п} = \frac{|T - \bar{Y}|}{z \sigma_{н.п.}} ; \quad (5)$$

Визначення відношення дисперсій неоднорідності (стабільності) до дисперсії тиражу дає змогу сформулювати та вирішити задачу розшарування негативною дією на технологічний процес на "внутрішню" (у вигляді окремої технологічної операції) і "зовнішню" (оцінка культури виробництва) складові. Визначення граничних показників точності окремої технологічної операції дозволяє оцінити наслідки негативною дією на технологічну операцію, точність формування даної технологічної операції.

$$K_{т.гр.} = \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2(q; \nu = n-1)}} + \frac{z t(q; \nu = n-1)}{\sqrt{n} l(n, \beta, \gamma)} ; \quad (6)$$

де  $n$  - об'єм вибірки;  $t(q; \nu = n-1)$  - табличне значення одностороннього критерія Стюдента при рівні значимості  $q \leq 0.05$  і числі ступенів вільності  $\nu = n-1$ ;  $\chi^2(q; \nu = n-1)$  - табличне значення одностороннього  $\chi^2$ -критерія при рівні значимості  $q \leq 0.05$  і числі ступенів вільності  $\nu = n-1$ ;  $l(n, \beta, \gamma)$  - табличне значення двохстороннього толерантного множника при статистичній надійності  $\beta \geq 0.95$ , частці  $\gamma \geq P_0 / 100$  і об'ємі вибірки  $n$ .

Розвинуто модель кореляційного аналізу результатів виробничого контролю, яка дозволяє оцінити стабільність процесу в часі та просторі, виявляти придатність параметрів для задач діагностики за їх однорідністю, проводити ранжування характеристик за показниками інформативності.

Визначення граничних коефіцієнтів точності, дисперсій, кореляційної стабільності, а також зсуву математичних сподівань пара-

метрів на різних рівнях контролю дозволяє побудувати таблиці експрес-аналізу локалізації області появи збурень з виділенням областей збурень технологічного процесу: гігієни виробництва, процесів у обладнанні, змінення технологічного маршруту, впливів матеріалів, стану напівпровідникових пластин на конкретному етапі формування напівпровідникового кристалу (з вказанням відповідних технологічних операцій). Крім того експрес-аналіз дозволяє розділити брак на катастрофічну і параметричну складові.

В третьому розділі проаналізовані питання побудови математичних моделей технологічного процесу і діагностики причин появи параметричного браку у реальному виробничому циклі. Для цього проведено аналіз особливостей технології виготовлення ІС, доведено необхідність використання статистичного апарату для встановлення функціонального взаємозв'язку між режимами процесу і параметрами пристрою на різних рівнях контролю. Обґрунтовано необхідність модифікації існуючих методів побудови регресійних моделей в умовах реального виробництва.

Передумовою побудови моделей визначено задачу попередньої обробки результатів тестового та виробничого контролю для оцінки статистичних моментів, виявлення грубих промахів та перевірки гіпотези про відповідність вибірки нормальному закону розподілу. Показані шляхи і алгоритми оцінки вибірових даних та приведення їх до нормального вигляду в статистичному розумінні.

Наступним кроком є формування ознакового простору для побудови математичної моделі. Основою для рішення такої задачі вибраний метод кореляційних плеяд, який дозволяє на базі матриці кореляції формувати повний граф кореляційних взаємозв'язків параметрів, виділити з нього граф (дерево) мінімальної кореляції і сформувати плеяди факторів. Представники плеяд вибираються згідно найбільшій інформативності для рішення задач діагностики і зв'язані між собою кореляційним відношенням (за допомогою полінома Чебишева).

Для побудови регресійних моделей модифіковано існуючі методи, оскільки пасивна контрольна-виміривальна інформація не узгоджується з правилами проведення факторних експериментів.

Модифіковано метод випадкового балансу. Труднощі цього методу, які пов'язані з громіздкими графоаналітичними розрахунками, усуваються з використанням нового підходу оцінок коефіцієнтів

регресії окремих факторів і парних взаємодій, що становить відмінність модифікованого методу випадкового балансу. Для використання цього методу факторний простір розглядається як простір у відносних координатах. Це забезпечується побудовою концентричної гіперсфери в області контрольованих параметрів. В результаті таких перетворень пасивний експеримент зводиться до псевдоактивного. За критерієм Бартлета здійснюється оцінка рівності дисперсій умовних розподілів параметрів, що забезпечує стійкість цього методу до присутності грубих промахів в експериментальних даних.

Забезпечення ефективності оцінки коефіцієнтів математичної моделі (мінімуму дисперсії) в умовах порушення гомоскедастичності і обумовило розробку нових співвідношень:

$$b_k = \frac{\left( \frac{D_{2k}}{N_{2k}} + \sigma_{m_k}^2 \right) \mu_{1k} - \left( \frac{D_{1k}}{N_{1k}} + \sigma_{m_k}^2 \right) \mu_{2k}}{\frac{D_{1k}}{N_{1k}} + \frac{D_{2k}}{N_{2k}} + 4 \sigma_{m_k}^2} ; \quad (7)$$

$$D_k = \text{CM} \{ b_k - \beta_k \}_{\text{опт}}^2 = \frac{\frac{D_{1k}}{N_{1k}} \mu_{1k}^2 + \frac{D_{2k}}{N_{2k}} \mu_{2k}^2 + \left( \frac{D_{1k}}{N_{1k}} + \frac{D_{2k}}{N_{2k}} \right) \sigma_{m_k}^2}{\frac{D_{1k}}{N_{1k}} + \frac{D_{2k}}{N_{2k}} + 4 \sigma_{m_k}^2} . \quad (8)$$

де  $\mu_{1k} = \frac{1}{N_{1k}} \sum_{j=1}^{N_{1k}(1k)} y_j$  ;  $\mu_{2k} = \frac{1}{N_{2k}} \sum_{j=1}^{N_{2k}(2k)} y_j$  - оцінки математичних сподівань підмножин вихідної величини, для яких знак  $x_{kj}$  є відповідно додатнім і (або) від'ємним;  $N_{1k}$ ,  $N_{2k}$  - об'єми відповідних підмножин, причому  $N_k = N_{1k} + N_{2k}$  - загальний обсяг вибірки для k-го фактора,  $D_{1k}$ ,  $D_{2k}$  - дисперсії вихідної величини у відповідно при додатніх і від'ємних варіаціях значень фактора  $x_k$ .

Враховання нерівності часткових дисперсій вибірок параметрів при виведенні цих співвідношень забезпечує мінімальну систематичну і випадкову похибки коефіцієнтів регресійних моделей.

Використання цих підходів ускладнюється при переході до планування другого порядку. З цієї метою модифіковано інший відомий метод побудови регресійних моделей на основі активного та пасивного експериментів - метод найменших квадратів. Оцінки коефіцієнтів, отримані методом найменших квадратів, представляють собою комплексні характеристики всіх вхідних факторів. При переході до планування другого і вищих порядків питання обумовленості мат-

риці вхідних факторів робить цей метод непридатним для використання його в класичному вигляді. У цьому випадку проблеми вирішуються попередньою ортогоналізацією факторів і побудовою ортогональних поліномів:

$$\hat{y} = \sum_{k=0}^p A_k \psi_k(Z), \quad (9)$$

де:  $\psi_k(z) = (z - \bar{z}) - \sum_{l=0}^{k-1} u_{kl} \psi_l(z); k = \overline{1, m}$ .

$$u_{kl} = \frac{\sum_{j=1}^n z_{kj} \psi_l(z)}{\sum_{j=1}^n [\psi_l(z)]^2}.$$

Оцінки коефіцієнтів регресії, отримані за значеннями коефіцієнтів ортогональних поліномів, є змішаними і відображають незалежний вклад кожного ефекту, що забезпечує їм більшу чутливість:

$$b_k = A_k - \sum_{l=k+1}^p A_l = u_{lk}, k = \overline{1, m}. \quad (10)$$

Для ортогоналізації вхідного плану використано алгоритм Грама-Шмідта.

На основі запропонованого підходу розглянуто процес виготовлення логічного елемента 2І-НЕ з двополярною вхідною напругою (L1488), сформований по біполярній планарно-епітаксійній технології. Аналіз статичних характеристик виробу L1488 показав, що основною причиною низького рівня проценту виходу придатних є відхилення струмів споживання за межі допустимих значень.

Використавши результати виробничих замірів контрольованих параметрів за останніх 6 місяців на функціональному, закличному, міжопераційному та операційному рівнях контролю по всіх технологічних операціях встановлено, що процес є потенційно точним та стабільним, але розкид середніх між партіями є дуже великий. Розшарування результатів контролю і оцінки за таблицями експрес-аналізу показали, що основний вклад у відхилення струмів споживання ( $I_{сн}$ ) за межі допустимих значень здійснює технологічна операція окислення перед іонним легуванням (створення низькоомних резисторів). Крім того брак є параметричним.

Використовуючи метод кореляційних плеяд, сформована структурна схема ознакового простору. Оцінка значимості факторного

простору і коефіцієнтів регресії забезпечує побудову математичних регресійних моделей, які зв'язують вихідні показники якості, параметри з різних рівнів контролю та режими технологічної операції і є статично чутливими до конкретного технологічного процесу. В кінцевому результаті загальний вигляд моделі буде:

$$I_{\text{сп}} \cdot R \cdot \rho_{\text{с}}^{\text{н}} \cdot n_{\text{окс}} = F(T, t, V_{\text{окс}}, V_{\text{вод}}) \quad (11)$$

де  $R$  - опір низькоомних резисторів;  $\rho_{\text{с}}^{\text{н}}$  - питомий поверхневий опір області формування резисторів;  $n_{\text{окс}}$  - товщина окислу над областю резисторів, через який проводиться іонне легування;  $T$  - температура проведення технологічної операції окислення;  $t$  - час проведення технологічної операції окислення;  $V_{\text{окс}}$  - швидкість подачі кисню;  $V_{\text{вод}}$  - швидкість подачі води.

Розроблені регресійні моделі та методи оцінки зміщень дозволили провести параметричну діагностику режимів проведення операцій. Вони показали, що температура процесу була занижена, про що свідчать і дані експерименту, проведеного в контрольно-діагностичній лабораторії. Мали місце неполадки у роботі термопари або непрофесіоналізм оператора, який обслуговував установку. Дослідження проводились на АТ "Родон", м. Івано-Франківськ.

Визначений довірчий коридор області адекватності цих моделей:

$$I_{\text{сп}} = 18.04 \pm 4 \text{ мА}, R_{\text{с}, \gamma} = 71.1 \pm 16.48 \text{ Ом}, \rho_{\text{с}}^{\text{н}} = 1599 \pm 80.6 \text{ Ом/см}^2, \\ n_{\text{окс}} = 0.129 \pm 0.026 \text{ мкм}.$$

Коридор існування моделей показує допустимі межі відхилень контрольованих параметрів виробу в параметричному ознаковому просторі і накладає умови поновлення моделей в задачах діагностики. Оцінено інформаційну місткість моделей.

У четвертому розділі розроблено архітектуру програмно-методичного комплексу (ПМК) "Аналіз" та його підсистем, визначено особливості побудови та функціонування комплексу і його складових частин. Запропонована модульно-ієрархічна структура функціонального наповнення ПМК. Вона полягає в розбитті функціонально наповнення ПМК на модулі, з подальшою декомпозицією їх, на основі ретельного аналізу предметної області. Така структура дозволила ефективно реалізувати розроблену методику, алгоритми та моделі діагностики процесу виготовлення ІС на всіх рівнях виробничого контролю.

Визначені функції базового, загальносистемного та спеціалі-

зованого програмного забезпечення (ПЗ) ПМК. Використаний спеціалізований монітор, який регламентує послідовність функціонування комплексу, формує схему рішення задач, визначає дерево рішення та використання часткових задач, забезпечує ефективну діалогову взаємодію з користувачем і коректне редагування та збереження інформації. Спеціалізоване ПЗ дозволяє використовувати різні моделі діагностики, поєднувати моделі різної складності, ефективно використовувати ресурс ЕОМ, доповнювати ПМК новими моделями та задачами.

Сформульовано основні задачі інформаційного забезпечення ПМК. Спроектовано і програмно розроблено взаємодію бази даних ПМК з базою даних АСУ контрольно-вимірковального обладнання АІСКАВТ.

Розроблена проблемно-орієнтована мова завдань ПМК, яка за допомогою запропонованих сценаріїв забезпечує швидку взаємодію з користувачем, підказку та навчання в процесі рішення задач, побудову оптимального дерева рішення часткових задач. Структура сценаріїв вхідної мови дозволяє провести статистичну обробку інформації, локалізацію області появи збурень, побудову регресійних моделей технологічного процесу виробництва ІС і діагностику параметричного браку.

### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Проведена систематизація технологічного процесу виробництва ІС, яка показує послідовність формування напівпровідникового пристрою, впливи внутрішніх та зовнішніх факторів в реальному виробництві, послідовно-ієрархічну структуру контрольно-діагностичних операцій, етапи рішення задач діагностики для забезпечення високого та стійкого рівня виходу придатних виробів.
2. Запропонована і проведена класифікація браку та причин його появи в виробничому процесі, що дозволяє систематизувати характеристики контролю, виділити рівні відмов, деформації в напівпровідникових кристалах і збурення в процесі виготовлення. Показана послідовність появи збурень, їх дія на фізичну структуру і електричні параметри та вплив на показники якості виробу, що дає можливість визначити задачі та методи діагностики як в процесі проектування ІС, так і при їх виробництві.
3. Розроблений алгоритм діагностики технологічного процесу виго-

товлення ІС, розробка і реалізація якого забезпечує: рішення задачі оцінки точності і стабільності процесу; проведення експрес-аналізу з метою локалізації області появи збурень; виділення інформативних контрольних-діагностичних параметрів; побудову математичних моделей об'єкту діагностики, визначення причин параметричного браку на всіх рівнях і етапах проходження виробничого процесу.

4. Розроблені, досліджені і реалізовані моделі оцінки точності і стабільності технологічного процесу виготовлення ІС, визначені граничні значення коефіцієнтів моделей для серії, партії та окремих пластин. Розвинутий підхід аналізу кореляційної стабільності параметрів, що дозволяє визначити контролепридатні параметри, ранжувати їх в порядку інформативності, забезпечує розшарування дисперсії контрольованих характеристик і виявлення збурюючих факторів між партіями, пластинами в партії та по поверхні кремнієвих підкладок.

5. Розроблені та побудовані алгоритм і тестові таблиці проведення експрес-аналізу з метою локалізації області появи збурень в технологічному процесі виготовлення ІС, що дозволяє за результатами виробничого контролю виявити основні причини нестасійного виходу придатних виробів і розділити їх на впливи гігієни виробництва, процесів в обладнанні, зміщення технологічного маршруту, стану напівпровідникових пластин та якості матеріалів для конкретної технологічної операції, а також розділити брак на параметричну і катастрофічну складові.

6. Розглянутий та розвинутий метод кореляційних плеяд для скорочення розмірності ознакового простору, що дозволяє на основі визначення кількості плеяд та найбільш інформативних їх представників сформувані словник контрольованих параметрів пристрою та технологічних характеристик виробничого процесу як необхідно і достатньою інформації про об'єкт дослідження в задачах діагностування і дає можливість об'єднати необхідні характеристики виробничого циклу та напівпровідникового виробу згідно всіх різнів контролю.

7. Модифіковані та реалізовані методи побудови регресійних моделей на основі активних та пасивних експериментів в умовах неортогональності і несиметричності планів, порушення вимог гомоскедастичності, які відповідають статистичній чутливості реального ви-

виробничого процесу, що дає можливість проводити діагностику параметричного браку за результатами пасивних даних контрольно-виміральної інформації.

8. Розроблений програмно-методичний комплекс, побудований за модульними принципами організації програмного забезпечення, з допомогою якого можна вирішувати окремі зачіпки обробки результатів виробничого контролю і на їх основі здійснювати побудову математичних моделей та діагностику технологічного процесу виготовлення ІС.

#### ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Коваль В.О., Гранат П.П., Підлишний Ю.В. Формування ознакового простору для задач діагностики технологічного процесу виготовлення ІС // Депоновано в ДНТБ України № 549 - Ук 96, 9 с.

2. Коваль В.О., Гранат П.П., Підлишний Ю.В., Коваль В.Я. Задача діагностики в процесі проектування та виготовлення напівпровідникових ІС // Депоновано в ДНТБ України № 550 - Ук 96, 6 с.

3. Гранат П.П., Підлишний Ю.В., Рудницький В.І. Методи статистичного ачалузу технологічного процесу виготовлення ІС // Сучасні проблеми автоматизованої розробки і виробництва радіоелектронних засобів та підготовки інженерних кадрів. - Львів, 1994. - С. 15-17.

4. Підлишний Ю.В., Коваль В.Я., Рудницький В.І. Методи статистичного аналізу технологічного процесу виготовлення ІС // Досвід розробки і застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці. - Львів, 1995. - С. 69.

5. Підлишний Ю.В., Александров Є.В., Коваль В.Я. Алгоритми побудови регресійних моделей технологічних процесів виготовлення ІС // Досвід розробки і застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці. - Львів, 1995. - с. 59-60.

6. Гранат П.П., Підлишний Ю.В., Коваль В.Я., Серапін Я.М. Рівні діагностування технологічних процесів виробництва ІС // Досвід розробки і застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці. - Львів, 1995. - С. 28-29.

7. Марків Я.С., Підлишний Ю.В. Підсистема побудови математичних моделей об'єкту діагностики при виробництві ВІС // Досвід розробки і застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці. - Львів, 1993. - С. 35.

8. Гранат П.П., Маркив Я.С., Підлишній Ю.В., Коваль В.Я. Систематизация технологических операций, уровней контроля и диагностики в процессе изготовления БИС // Машинное моделирование и обеспечение надежности электронных устройств : Тез. докл. НТК, - Воронеж, 1993. - С.59.

9. Підлишній Ю.В., Коваль В.Я. Попередня обробка результатів тестових контролів // Сучасні проблеми автоматизованої розробки і виробництва радіоелектронних засобів та підготовки інженерних кадрів. - Львів, 1996.- С.126-127.

10. Долгов Ю.О., Підлишній Ю.В., Коваль В.Я. Генератор статистичного багатовимірного моделювання технологічних процесів виготовлення ІС // Сучасні проблеми автоматизованої розробки і виробництва радіоелектронних засобів та підготовки інженерних кадрів. - 1996.- С. 132-133..

Особистий внесок автора в отриманні наукових результатів полягає в тому, що положення, які складають суть дисертації були сформульовані і вирішені ним самостійно:

- 1) аналіз задач діагностики в процесі проектування та виготовлення ІС /2 /;
- 2) систематизація технологічного процесу виготовлення ІС, як об'єкту діагностики /8,6/;
- 3) розробка методів статистичного аналізу технологічних процесів виготовлення ІС /3,4,10/;
- 4) розробка методів побудови регресійних моделей об'єктів діагностики за результатами пасивної контрольно-виміральної інформації /7,9/;
- 5) розробка алгоритмів параметричної діагностики технологічних процесів виготовлення ІС /5,1/;
- 6) розробка та реалізація програмно-методичного комплексу діагностики технологічних процесів виготовлення ІС /1/.

Отже, особистий вклад автора в частині матеріалу, покладеного в основу дисертації, є визначальним.

Abstract

Pydlypnyj Yu.V. Development of the models, methods and algorithms of the IC's manufacturing diagnosis. Candidate of Technical Sciences Thesis in speciality 05.13.05 - "Computer-aided design". State University "Lviv Polytechnic", Lviv, 1996.

Models, methods and algorithms of the the IC's manufacturing diagnosis, which includes systematization of manufacturing; classification of defects and reasons of its appearing; models and methods of express-analysis of localization of the area disturbances appearing, of definition of precision and stability of manufacturing cycle, of formation of regression models with the use of passive control-measuring information and parametrical defects diagnosis on this base of are defended in this thesis.

It is ascertained that the use of models methods and algorithms, developed on the basis of system approach together with software tools of design is reasonable and effective.

Аннотация.

Пидлипний Ю.В. Разработка моделей, методов и алгоритмов диагностики технологических процессов производства ИС. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - "Системы автоматизации проектирования". Государственный университет "Львівська політехніка", г.Львов, 1996 г.

В диссертационной работе защищаются: модели, методы и алгоритмы диагностики процесса производства ИС, которые включают систематизацию технологического процесса; классификацию брака и причин его возникновения; модели и методы экспресс-анализа локализации области возникновения возмущений, оценки точности и стабильности производственного цикла, построения регрессионных моделей с использованием пассивной контрольно-измерительной информации и на их основе диагностики параметрического брака.

Установлено, что использование разработанных на основании системного подхода моделей, методов и алгоритмов в комплексе с инструментальными средствами проектирования целесообразно и результативно.

Ключові слова: САПР, технологічний процес, математична модель, діагностика.

АВ 35.514

Підписано до друку 29.08.96 Формат паперу 60x84 I/16  
Папір друкарський. Друк офсетний. Безкоштовно.  
Друкарських листів I. Зап. 196. Тираж 100.

---

ПТЦ "Агрософт" м. Львів, вул. 700-річчя Львова, 63а.