КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

*На правах рукопису*

УДК 621.372:681.3

МІКУЛЬЧЕНКО Олег Ігоревич

# МЕТОДИ І ЗАСОБИ ТЕХНОЛОГІЇ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ

05.13.12.— Системи автоматизації проектування (по галузям)

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

КИЇВ — 1993

КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

УДК 621.372 : 681.3

МІКУЛЬЧЕНКО Олег Ігоревич

# МЕТОДИ І ЗАСОБИ ТЕХНОЛОГІЇ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ

05.13.12. - Системи автоматизації проектування ( по галузям )

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

КИЇВ - 1993

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі теоретичної електроніки Київського політехнічного інституту

Науковий керівник - кандидат технічних наук, доцент Зубчук В.І.

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор Забара С.С ,
кандидат технічних наук, Груданов М.Б.

Ведуча організація - Інститут проблем моделювання в енергетиці АН України

Захист відбудеться "20" грудня 1993 р. о 15 год. на засіданні спеціалізованої ради К 068.14.17 при Київському політехнічному інституті за адресою: 252056, м. Київ, пр. Перемоги 37.

Автореферат розіслано "4" 11 1993 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради к. т. н. Ю.Д. Кобцев

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розширення сфер використання систем автоматизованого проектування (САПР) радіоелектронної апаратури (РЕА) пов'язане з багатьма складностями. Одним з головних чинників, що стримують поширення САПР, є невідповідність між потужними алгоритмічними спроможностями САПР і низькою автоматизацією процеса одержання адекватних моделей елементів РЕА.

Вирішити задачу оперативного формування моделей елементів на базі окремого використання стандартних методів не завжди вдається. Більш кардинальним заходом є застосування цільної інформаційної технології моделювання, що забезпечує кінцевого користувача САПР достатньою інформацією. Щоб створити технологію моделювання, необхідно : 1) досягти алгоритмічної надійності моделей у складі програм аналізу; 2) забезпечити надійність і ефективність засобів генерації моделей (не зважаючи на кваліфікацію кінцевого користувача і не накладаючи жорстких вимог до складу первинної інформації) ; 3) об'єднати розрізнені методики у програмний комлекс оперативного формування моделей. Існуючі універсальні засоби не відповідають належним чином сукупності першої та другої вимог, які формулюють практичну специфіку. Доцільно розробити методи, *орієнтовані* саме на розв'язання цих задач у складі інформаційної технології.

**Мета роботи** : дослідження і розробка методів формування та застосування моделей елементів радіоелектронних схем ; охоплення моделями обсяжної номенклатури серійних елементів; створення математичного та програмного забезпечення підсистеми оперативного формування моделей елементів схем.

**Наукову новизну** мають положення, що **виносяться до захисту** :

1. Технологічний процес оперативної генерації моделей на базі використання узагальненої адаптивної моделі з мінімальною схемою.

2. Багатовимірні ізогеометричні сплайни для інтерполяції та апроксимації з нерегулярною сіткою у вигляді локальних тричленів з варіючим показником степені.

3. Адаптивний метод оптимізації з підвищеною ефективністю для задач параметричної ідентифікації, який комбінує методи з кількома повними кроками по квадратичній моделі з методами,що дроблять крок із умови зменшення мінімізуємої функції на кожному кроці.

4. Метрика нев'язки моделі і об'єкта, узгоджена з похибками вимірів та обчислювань на підставі точечно-множинної відстані.

5. Алгоритм генерації векторів квазівипадкових чисел з підвищеною рівномірністю розподілу у вигляді точок сітки, яка створена одновимірними максимально рівномірними сітками .

6. Алгоритм прискореного двобічного ймовірного аналізу заходом відділення найвагоміших статистично змінних параметрів.

7. Алгоритми моделювання залежностей електромагнітних та напівпровідникових приладів, цифрових мікросхем та мікросхем аналогових комутаторів.

**Практичне значення :**

Бібліотека моделей і підсистема оперативного формування нових моделей, створені на базі розроблених методів і засобів, в сукупності з універсальними програмами схемотехнічного аналізу дозволяють : 1) скоротити час проектування та випробувань виробів РЕА; 2) підвищити вірогідність оцінки надійності вузлів РЕА в умовах зовнішніх діючих факторів (ЗДФ); 3) замінити руйнуючі натурні випробування їх моделюванням на ЕОМ; 4) моделювати багатофакторні дії, які не відтворюються в натурних умовах.

**Впровадження результатів** . Основні результати дисертації використані в господарчих договірних роботах, виконаних на кафедрі теоретичної електроніки Київського політехнічного інституту : НИР " Разработка комплекса макромоделей ИМС для САПР РЭА с учетом дестабилизирующих факторов и длительного функционирования " Гос. рег.№ 01840004559, НИР "Разработка макромоделей типовых фрагментов БИС преобразователей информации" Гос. рег.№ 01840004560, НИР " Исследование и разработка методов и средств моделирования интегральных микросхем для САПР РЭА с учетом ДВФ " Гос. рег. № 01870031540, НИР "Исследование, разработка и внедрение методов оперативного моделирования электронных компонентов и схем на базе ИВК ", НИР " Оценка радиационной стойкости средствами САПР". Розроблене програмне забезпечення впроваджено на підприємствах " НПО прикладной механики", м.Красноярськ-26,"АЛЬФА", м. Рига. Сумарний економічний ефект впровадження з урахуванням пайової участі становить 151.000 карбованців в цінах 1989 р., що стверджується відповідними актами.

**Апробація роботи** . Результати доповідались на : республіканській конференції " Моделювання і ідентифікація компонентів та вузлів електронної техніки" (Київ,1985 р.); 8-ій республіканській школі- семінарі по теоретичній електротехніці та електроніці, (Львів-Шацьк, 1986 р.); 4-ій всесоюзній школі-семінарі "Математичне і машинне моделювання в мікроелектроніці" (Рига, 1986 р.); 1-ій Всесоюзній нараді " Математичне моделювання приладів мікроелектроніки" (Новосибірськ, 1987 р.); школі-семінарі " Методи автоматизованого проектування електронно-обчислювальної апаратури та НВІС " (Вінниця-Чернівці,1988 р.); республіканській школі-семінарі " Електромагнітні та напівпровідникові перетворювачі" (Алушта,1989 р.);

республіканських конференціях " Проблемна адаптація алгоритмічного та інформаційного забезпечення САПР" (Київ, 1986-1990 рр.), 1 -ій Всесоюзній конференції " Радіаційна стійкість бортової апаратури і елементів космічних апаратів " (Томськ, 1991 р.); 1-ій Міжнародній конференції " Проблеми взаємодії космічних літальних апаратів з космічним оточенням " (Новосибірськ, 1992 р.); республіканських конференціях "Проблеми автоматизованого моделювання в електроніці" (Київ, 1991-1993 рр.).

Публікації . Результати дисертації викладені в 5 звітах по НДР та в 16 статях, перелікованих в кінці автореферату.

Структура і об'єм дисертації . Робота має вступ, чотири глави, закінчення та додаток. Загальний обсяг - 189 сторінок, з яких 145 сторінок основного тексту. Дисертація має 34 малюнка, 5 таблиць, та список літератури, що має 192 назви на 16 сторінках.

## ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить загальну характеристику роботи. Викладаються актуальність та новизна дисертаційної теми, задачі і мета, тези захисту, анотація за главами.

Перша глава є оглядом. Розглядаються структурні та операційні властивості процесу моделювання елементів РЕА. Даються головні загальні протилежності схемотехнічного моделювання, зумовлені інформаційною недостатністю. Відмічається неможливість визначення усіх конкретних вимог до моделей на початку моделювання.

Наступний параграф містить сукупність загальних вимог до моделей елементів РЕА. Розглядаються вимоги до моделей при формуванні (ідентифіцируємість, обумовленість, зв'язок з фізико-топологічними параметрами), при застосуванні (точність, економічність,адаптивність, зображеність стандартними параметрами, виразність, урахування методів схемотехнічного аналізу, алгоритмічна надійність) та при супроводі ( мобільність, відкритість, діагностируємість, уніфікація). Робиться висновок - компроміс між численними та протилежними вимогами стає можливим тільки при комплексному, системному підході. Потребується інформаційна технологія моделювання.

В наступному параграфі визначається дерево цілей технології моделювання. Відповідно до цього дерева розглядається стан схемотехнічного моделювання елементів РЕА. Наводяться недоліки існуючої сукупності моделей : недостатність макромоделей третього рівня складності, низька алгоритмічна надійність, мала адекватність моделювання деяких режимних залежностей напівпровідникових приладів.

Розглядаються проблеми у галузі засобів формування моделей. Дається висновок щодо апроксимації – сукупність вимог з боку програм аналізу ( економічність, обумовленість, відсутність осциляцій ) та з боку відповідності первинній інформації ( багатовимірність, рідка сітка даних) створюють фільтр, що відсіює великий арсенал існуючих методів. Універсальні методи оптимізації також мають недостатню ефективність стосовно практичних задач з типовими умовами яристості та поганої обумовленості. У галузі використання моделей визначається доцільність розвитку алгоритмів прискореного ймовірного аналізу як засіб дослідження моделей і як самостійна мета.

Друга глава присвячена методам формування та застосування моделей. Маючи на меті універсальність, математичний апарат викладається на загальному теоретичному рівні. Розроблені методи характеризуються спрямованністю до практики та додатковістю до існуючих.

В численних задачах існує потреба оцінювати близкість між моделлю та об'єктом на заданих множинах точок $\mathcal{S}_T$ і $\mathcal{S}^M_T$, де $\mathcal{S}_T \subset \mathcal{S}$, $\mathcal{S}^M_T \subset \mathcal{S}^M$, $\mathcal{S}$ ($\mathcal{S}^M$) – n-арне відношення, що зображує оператор об'єкта (моделі). Найчастіше використовують оцінку нев'язки у вигляді $L_p$-норми вектора нев'язок $r \in R^m$: $\|r\|_p = (\Sigma\ |r_i|^p)^{1/p}$, де $r_i = y_i - y^M_i$, $y_i$ – ордината характеристики об'єкта, $y^M_i$ – відповідна ордината, обчислена по моделі. Такий спосіб придатний до практики, але йому властиві недоліки: 1) оцінка чутлива до вибіру ординати (незворотність оцінки при виборі різних змінних, які вважатимуться за ординату ); 2) круті ділянки залежності $y=f(x)$ в сукупності з похибками вимирів та обчислювань приводять до викидів, які дають великий внесок і нівелюють внесок інших точок. Для подолання другого недоліку розроблені функції Х'юбера, Бітона-Такі та ін. Але ці функції носять емпіричний характер і використовують константу, що має бути вибрана належним чином, а це знижує їх універсальність.

Пропонується застосовувати відстань між скінченною дискретною множиною $\mathcal{S}_T(\mathcal{S}^M_T)$ і безскінченною неперервною множиною $\mathcal{S}^M(\mathcal{S})$ відповідно для приблизної оцінки відстані між неперервними множинами $\mathcal{S}$ і $\mathcal{S}^M$. Для цього в свою чергу пропонується наступний функціонал :

$$\rho(\mathcal{S},\mathcal{S}^M) = \|(\|d_1\|, \|d_2\|)\|,\ d_1 \in R^m,\ d_2 \in R^m,\ d_{1i} = dist(y_{Ti}, \mathcal{S}^M),$$
$$d_{2i} = dist(y^M_{Ti}, \mathcal{S}),\ i=1,\dots,m.$$

В залежності від властивостей задач замість двох векторів $d_1$ і $d_2$ використовується один з них. За оцінку відстані між точкою $(y_{Ti}, x_{Ti})$ і множиною $\mathcal{S}^M$ пропонується брати відстань від точки до гіперплощини, дотичної до поверхні $y^M(x)$ в точці $(y^M_{Ti}, x_{Ti})$. Тоді :

$$d_{1i} \approx (y_{Ti} - y^M_{Ti})/(1+\|g_i\|^2)^{1/2},\ g_i = \partial y^M(x)/\partial x \mid x = x_{Ti}.$$

Аналогічно, $d_{2i} \approx (y^M_{Ti} - y_{Ti})/(1+\|\tilde{g}_i\|^2)^{1/2}$, $\tilde{g}_i = \partial y(x)/\partial x \mid x = x^M_{Ti}$.

Множинник $w_i=1/(1+\|g_i\|^2)^{1/2}$ легко обчислюється при наявності градієнта $g$ і може трактуватися як засіб узгодження похибки моделювання з похибками вимирів та обчислювань, котрі обумовлені значною локальною крутизною функції $y(x)$.

В наступному параграфі розглядаються сплайни, розроблені для практичних задач відновлення даних. Обчислювальний досвід дає грунт до висновку: традиційні теоретичні вимоги до методів (оптимальність при обов'язковому виконанні гіпотетичних умов ) потребують доповнення практичними вимогами ( раціональність та надійність одержання результату без аналізу попередніх умов). Саме на останню мету націлені розроблені сплайни.

Сплайни створюються локальними тричленами з варіючим показником степені ( комбінується кусково-лінійна та степенева функції ):

$$s(x)=\begin{cases} y_i+a_{i-1}(x-t_i), & \text{якщо } (t_{i-1}+q_{i-1}) \le x \le (t_i-\tau_i)=x_i; \\ y_i+a_{i-1}(x-t_i)+b_i(x-x_i)^{r_i}, & \text{якщо } x_i< x <x_i+d_i=x_i+\tau_i+q_i=t_i+q_i; \\ y_m+a_m(x-t_m), & \text{якщо } x_m+d_m\le x; \end{cases}$$

де $t_1<t_2<\ldots<t_m$ -вузли сплайна; $a_i=(y_{i+1}-y_i)/(t_{i+1}-t_i)$; $\tau_i/q_i=r_i-1$; $b_i=q_i(a_i-a_{i-1})/d_i^{r_i}$. Функція $s(x)$ однозначно визначається параметрами $t_i,y_i,\tau_i,r_i\ (i=\overline{1,m})$ та граничними умовами $a_0$, $a_m$.

Сплайн-інтерполяція використовує модифікацію алгоритма Акіми, по якій визначаються оцінки похідних інтерполюємої функції $f(x)$ у точках $(x_i,f_i(x_i))$: $g_i=(w_{i+1}k_{i-1}+w_{i-1}k_i)/(w_{i+1}+w_{i-1})$, $w_i=|k_i-k_{i-1}|$, $k_i=(f_{i+1}-f_i)/(x_{i+1}-x_i)=\Delta f_i/h_i$, $i=\overline{3,m-2}$; $g_i=(h_{i-1}k_i+h_ik_{i-1})/(h_{i-1}+h_i)$, $i=2,i=m-1$; $g_1=\tilde{g}_1$ якщо $sign(\tilde{g}_1)=sign(g_2)$, $g_1=0$ якщо $sign(\tilde{g}_1)\neq sign(g_2)$, $g_m=\tilde{g}_m$ якщо $sign(\tilde{g}_m)=sign(g_{m-1})$, $g_m=0$ якщо $sign(\tilde{g}_m)\neq sign(g_{m-1})$, $\tilde{g}_1=(h_1(2k_1-k_2)+h_2k_1)/(h_1+h_2)$, $\tilde{g}_m=(h_m(2k_m-k_{m-1})+h_{m-1}k_m)/(h_m+h_{m-1})$. З інтерполюємих точок $(x_i,f_i(x_i))$ проводяться прямі з коефіцієнтом нахилу $g_i$. Перетин прямих визначає параметри $y_i,t_i$. Ціле число $r_i$ обчислюється по відношенню : $r_i=[(t_i-x_i)/(t_{i+1}-x_i)]+1$. Ділянка нелінійності $d_i$ максимальна: $d_i=\min\{t_i-x_i,(t_{i+1}-x_i)(r_i-1)\}$.

Сплайни мають ізогеометричність порядку один стосовно кусково-лінійної інтерполяції на будь-якій сітці даних. Сплайни на базі кубічних чотиричленів, навіть навмисне розроблені для боротьби з викидами (так званий напружений сплайн та сплайн Акіми), цього не забезпечують. Приклад придатності виключно розроблених сплайнів наводиться в роботі. Особливо вагомо забезпечити ізогеометричність стосовно до вимог програм моделювання, бо: багато показників визначаються за похідними, які потрібно адекватно відображати; наявність осциляцій може привести до розбіжності чисельних методів.

В задачах апроксимації сплайни припускають призначення параметрів безпосередньо за наявними графіками і мають виразний зміст.

Інтерполяційні властивості сплайнів дозволяють без ризику викидів відновлювати функції багатьох змінних. Хай є n+1 змінних, з яких відділяється перебіжна змінна x та n-вимірний вектор u. Вважаємо, що в області визначення u маємо регулярну сіть $\Delta_n$, у вузлах якої визначені вектори параметрів $\theta_{k1,\dots,kn}$, що входять до складу одновимірного сплайну $s(x,\theta)$ при $u=(u_{1k1},u_{2k2},\dots,u_{nkn})$. Позначимо через $\Theta_n$ множину усіх векторів $\theta_{k1,\dots,kn}$ на сітці $\Delta_n$. Тоді сплайни n+1 змінних припускають визначення формулами :

$$S(x,u)=s(x,\theta(u_1,\theta_1(\dots(\theta_{n-1}(u_n,\theta_n\underbrace{))\dots)}_{n+1}) ;\ \theta_{i-1}(u_i,\theta_i)=S_i(u_i,\theta_i);$$

$$S_i:R^1\times R^{M\times l_1\times\dots\times l_i}\to R^{M\times l_1\times\dots\times l_{i-1}}|\vartheta^m_{k1,\dots,ki-1}=s(u_i,\vartheta^m_{k1,\dots,ki});$$

$i=\overline{1,n}$; $k_i=\overline{1,l_i}$; $m=\overline{1,M}$; $\theta\in R^M$, $\theta=[\vartheta^1,\dots\vartheta^M]^T$; $\theta_{i-1}$ - множина векторів параметрів, визначена для довільних змінних $u_i,\dots,u_n$ при фіксованих змінних $u_1,\dots,u_{i-1}$.

Сплайни $S(x,u)$ пристосовуються до апроксимації сімей характеристик, бо сітка по осі x не є регулярною, що відрізняє $S(x,u)$.

В наступному параграфі наводиться схема конструювання адаптивних засобів моделювання. Адаптивну систему пропонується зображати у вигляді прямого декартового множення чотирьох множин : $AS = \{ \{O\}\times\{M\}\times\{E\}\times\{C\}\}$, де $\{O\}$ - множина об'єктів адаптації, $\{M\}$- множина методів оперування $\{O\}$, $\{E\}$ - множина критеріїв якості в об'єктно-процедурних термінах ( внутрішні критерії), $\{C\}$ - множина критеріїв якості розв'яання головної задачі ( зовнішні критерії). Адаптація полягає у релаксації показника $C$ з циклами релаксації показників $E$ таким чином, що на грунті апріорної та апостеріорної інформації відділяються такі елементи $O,M,E$, котрі відповідають оптимуму $C$. За такою загальною схемою побудовано методи оптимізації та узагальнені адаптивні моделі, що розглядаються нижче.

Далі пропонується система методів оптимізації для задач ідентифікації параметрів моделей статичних детермінованих об'єктів за даними вимірювань та відомому оператору моделі. Оптимізація формулюється як пошук локального мінімуму одновимірної функції $F(\theta)$ у просторі параметрів $\theta$ з двобічними обмеженнями на параметри :

Знайти $\theta^* = \mathrm{argmin}(F(\theta))=\mathrm{argmin}\|W_i(y_i-F^M(x_i,\theta))\|$, $i=1,\dots,m$; $\theta^*\in\Omega$, $\Omega:a_i\le\vartheta_i\le b_i$; $\theta\in R^n$; $x_i\in R^{Lx}$; $y_i\in R^{Ly}$; $F^M(x,\theta):R^{Lx}\times R^n\to R^{Ly}$- оператор моделі; $X=[x_1,\dots,x_m]$ - масив виміряних значень аргументів (вхідних змінних об'єкта та моделі ), $Y=[y_1,\dots,y_m]^T$-масив виміряних значень реакцій ( вихідних змінних об'єкта ); $\|A\|$ - $L_{2p}$- норма Фробеніуса матриці A, що зводиться до виду $R^TR, R\in R^{mLy}$, $W_i$-i-те значення вагової матриці $W\in R^{Ly}\times R^{Ly}$. У цьому випадку $F(\theta)=\sum_{k=1}^{mLy} f_k^2(\theta)= =\|f\|_2^2$.

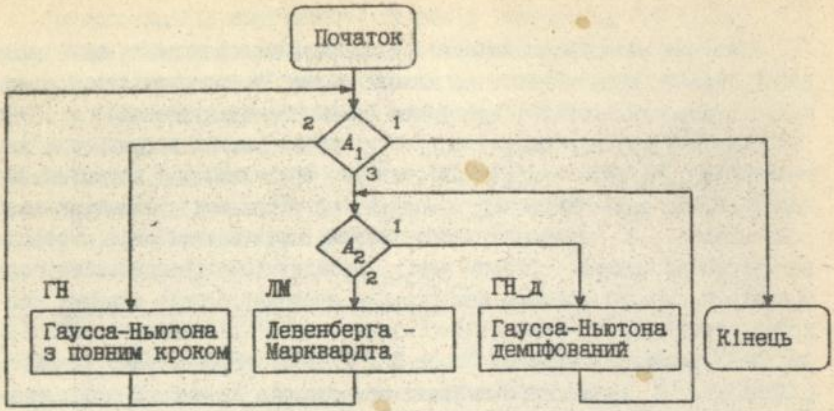
Система методів оптимізації призначується для того, щоб: мати надійність та ефективність на класах задач (як простих так і ярристих, погано обумовлених); врахувати специфіку ідентифікації.

Систему методів оптимізації $M_{opt}$ пропонується зображати у вигляді: $M_{opt}=\{\{OM\}\times\{A\}\times\{E\}\times\{C\}\}$, де $OM$- обчислювальні модулі; $A$ - адаптори, що здійснюють вибір модуля; $E$ - критерії обчислювальної ефективності, $C$ - критерії якості результатів оптимізації стосовно використання моделі. В свою чергу, множину $\{OM\}$ пропонується розкривати у вигляді прямого декартового множення блоків окремих процедур оптимізації : $\{OM\}=\{\{G\}\times\{Tr\}\times\{S_0\}\times\{S\}\times\{Sol\}\times\{R\}\times\{Stop\}\times\{N\}\}$, де $G$-апроксимація матриці Гессе $G=\partial^2F/\partial\theta^2$, $Tr$-визначення траєкторії кроку, $S_0$-обчислення довжини початкового кроку, $S$-пошук припустимої точки на траєкторії кроку, $Sol$-розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), $R$ - урахування обмежень $\Omega$, $Stop$ - припинення оптимізації, $N$ - оцінка норми відхилення.

Грунтуючись на відомих результатах та на дослідженні властивостей задачі ідентифікації запропоновано наповнення системи існуючими та розробленими модулями. Розроблено: вибір активного набору варіючих параметрів для розв'язання погано обумовлених СЛАР; адаптори для реалізації ефективного адаптивного методу оптимізації.

Вибір активного набору поєднує властивості спектрального розкладу з властивостями факторизації Холецького. А саме : достатня інформаційність та придатність до випадку виродженості СЛАР поєднується з обчислювальною ефективністю. Основою пропонованого алгоритму є те, що число обумовленості матриці Гессе має такий же порядок, що і величина $d_{max}/d_{min}$, де $d_i$ -елементи матриці D розкладу Холецького $G=LDL^T$. Тому по значенню $d_{max}/d_i$ можливо оцінити лінійну залежність параметру $\theta_i$ з іншими параметрами. В алгоритмі використовується керуєме число $\tau$, згідно з яким при $d_{max}/d_i\geq\tau$ i-й параметр вилучається з активного набору на поточному кроці мінімізації. Керуючи числом $\tau$ відповідно до наведених у роботі рекомендацій вдається опріч вирішення проблеми поганої обумовленості поліпшити також суто оптимізаційні якості.

Адаптивний метод оптимізації використовує найбільш ефективні методи розв'язання нелінійних задач найменших квадратів - метод Гаусса-Ньютона з повними кроками та методи з релаксацією мінімізуємої функції на кожному кроці : демпфований Гаусса-Ньютона з лінійною траєкторією пошуку на кроці та метод екстраполяції довірного околу у формі Левенберга-Марквардта. Адаптивний метод зображається алгоритмом (мал.1), в якому використовуються адаптори $A_1$,$A_2$, котрі по інформації о стані оптимізації вибирають поточний метод.




Мал. 1. Алгоритм адаптивного методу оптимізації

Поточна поведінка процесу оптимізації відображається в адапторах чотирма показниками : 1) $\tilde{F}_{min,k}=\min\{F_t\}|t=\overline{k-r,k}$; 2) $F_k/F_{k-1}$; 3) $\alpha_1=(\Delta\theta_k^T\Delta\theta_{k-1})/(\|\Delta\theta_k\|*\|\Delta\theta_{k-1}\|)$; 4) $\alpha_2=(\Delta\theta_k^T\Delta\theta_{кгн})/(\|\Delta\theta_k\|*\|\Delta\theta_{кгн}\|)$, де $\Delta\theta_{кгн}=-(J_k^TJ_k)^{-1}\nabla F_k$, $J_k=\partial f(\theta_k)/\partial\theta$ - матриця Якобі.

Адаптор $A_1$ :

ЯКЩО : виконуються умови знаходження локального мінімуму
ТО : йти на КІНЕЦЬ оптимізації (ВИХІД 1)
ІНАКШЕ : ЯКЩО : k-й метод - ГН
ТО : ЯКЩО : $\tilde{F}_{min,k} < \tilde{F}_{min,k-1}$ ТА $F_k/F_{k-1} < 10^L$
ТО : k+1-й метод -ГН (ВИХІД 2)
ІНАКШЕ : йти на адаптор $A_2$ (ВИХІД 3)
ІНАКШЕ : ЯКЩО : $k_{лм} \le r$ ($k_{лм}$-число поточних кроків ЛМ)
ТО : йти на адаптор $A_2$ (ВИХІД 3)
ІНАКШЕ : ЯКЩО : $\alpha_1 \le 1-\varepsilon_1$ ТА $\alpha_2 \le 1-\varepsilon_2$
ТО : k+1-й метод -ГН (ВИХІД 2)
ІНАКШЕ : йти на адаптор $A_2$ (ВИХІД 3)

КІНЕЦЬ перевірки умов ЯКЩО та адаптору $A_1$.

Адаптор $A_2$ :

ЯКЩО : $|\alpha_2| \le \varepsilon_2$ ТА $k_{ГН\_д} \le r$ ($k_{ГН\_д}$-число поточних кроків ГН_д)
ТО : k+1-й метод - ГН_д (ВИХІД 1)
ІНАКШЕ : k+1-й метод - ЛМ (ВИХІД 2)

КІНЕЦЬ перевірки умови ЯКЩО та адаптору $A_2$.

Адаптори містять константи методу $r, L, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ та константи критеріїв припинення оптимізації. В роботі рекомендуються їх типові значення, припустимі для класів задач та перевірені на практиці.

Перехід від методу ГН до однокроково-релаксаційних методів відбувається або тоді, коли відсутня релаксація на r кроках, або тоді, коли є різкий викид. Зворотній перехід має місце, коли кут між суміжними кроками та кут між поточним кроком і кроком методу ГН наближаються до нуля. Це свідчить про те, що йде просунення вздовж дна вузького пологого яру з майже паралельними кроками, напрямок котрих майже співпадає з напрямком Гаусса-Ньютона. Тому робиться спромога зробити великий крок, вийти на стінку яру, а потім на r повних кроках досягти зменшення функції F (це можна інтерпретувати як рестарт, що має деяку аналогію з відомим яристим методом Гельфанда-Цетліна). Якщо F не зменшується, то r повних кроків відкидаються і оптимізація звертається до методів з дробленням кроку. Коли кут між суміжними кроками близький до прямого ( розворот на дні яру), то застосовується ГН_д. В інших випадках використовується метод ЛМ, ефективніший за ГН_д в найбільш ймовірних умовах.

Теоретична доцільність адаптивного методу визначається його істотними рисами. А саме, метод : 1) на простих задачах збігається з методом ГН ( зокрема, для лінійних моделей гарантує мінімум за один крок); 2) об'єднує гарантію теоретичної збіжності (за рахунок "глобальної" релаксації) з ймовірною ефективністю метода з повними кроками; 3) намагається здійснювати максимальні по довжині кроки; 4) використовує як спуск по квадратичній моделі F, так і елементи, що мають деякі аналогії з яристими та розшуковими методами.

Практична доцільність адаптивного методу стверджується тестуванням, що наводиться в роботі, на класах задач в різних галузях. Зокрема, для широко відомої яристої багатовимірної функції Розенброку метод ( разом з розглянутим алгоритмом вибору активного набору) досягає точного мінімуму : для 2-х змінних - за 3 кроки, для 10-ти змінних - за 30 кроків, для 20-ти змінних - за 33 кроки. Це перевершує відомі результати інших методів на 1-3 порядки.

В наступному параграфі розглядаються питання статистичного моделювання. Робиться висновок - додатково до існуючих універсальних алгоритмів доцільно розробити алгоритми, згідні з типовими рисами практичних задач. У галузі схемотехнічного аналізу виділяються дві типові риси: 1) число випробувань ( інакше - обсяг виборки, число одноразових обчислень) обмежується припустимим часом моделювання схем: $N<100-200$; 2) статистично мінливі параметри мають суттєво неоднаковий вплив на вихідні статистично мінливі показники.

Відповідно до практичних рис пропонується алгоритм генерації квазівипадкових чисел з підвищеною рівномірністю розподілу в єдиничному гіперкубі G ($0\le x^j\le 1, j=\overline{1,m}$) для незначного числа $N=k^m$.

Алгоритм має вид, подібний до метода розшаруваної виборки : $x_i=[x_i^1,x_i^2,\dots,x_i^m]^T=1/k*(i-\gamma_i)=[(i^1-\gamma_i^1)/k,\dots,(i^m-\gamma_i^m)/k]^T$; $i=\overline{1,N}$; $i^1=\overline{1,k};\dots;i^m=\overline{1,k}$; $\{\gamma_i^j\}=\Gamma_N^m\subset\Omega\subset G$; $\Omega=\Omega^1\times\dots\times\Omega^m$, $\Omega^j=\{(l-0.5)/N\}$, $l=\overline{1,N}$, $j=\overline{1,m}$; $\Gamma_N^m$: $r_{x_s x_t}\equiv 0\,\forall s\neq t$, $D_N^m(x(\Gamma_N^m))=\min\limits_{W\subset\Omega}(D_N^m(x(W)))$, $D_N^1(x^s)\equiv\inf(D_N^m(x))=$ $=0.5\ \forall\ s$, $s=\overline{1,m}$, $t=\overline{1,m}$. Тут : $r_{x_s x_t}$ - коефіцієнт кореляції між сукупністю точок компоненти $x^s$ вектора $x$ та сукупністю точок компоненти $x^t$ цього $x$ вектора; $D_N^m$ - відхилення групи точок (N точок) у m-вимірному просторі, що характеризує рівномірність і визначається відношенням: $D_N^m(x)=\sup|S_N(\Pi_x)-NV(\Pi_x)|$, $x\in G$, $\Pi_x$-паралелепіпед з діагоналлю Ox і об'ємом $V(\Pi_x)$, $S_N(\Pi_x)$-число точок в $\Pi_x$.

Для пошуку сітки $\Gamma_N^m$, котра гарантує відсутність кореляції компонент $x$ , досягнення мінімума $D_N^m(x(\Gamma_N^m))$ та максимальну рівномірність розподілу проекцій $x$ на окремі координатні осі $x^j$ розроблено алгоритм обертання рівномірної сітки. Гіперкуб G розділяється на підкуби $\tilde{G}_i$:$G=\bigcup\tilde{G}_i$,$\bigcap\tilde{G}_i\equiv\emptyset$, $i=\overline{1,2^m}$; підкуби формуються перетином G гіперплощинами, що ортогональні до граней G і проходять крізь його центр. Один підкуб наповнюється сіткою $\Gamma_L^m$, яка має $L=N^{1/m}$ точок. Заповнений сіткою підкуб обертається навколо центру G так, щоб заповнити увесь об'єм G. На сітці $\Gamma_L^m$ шукається мінімум $D_N^m(x(\Gamma_N^m))$.

Наводяться приклади ефективності розробленого алгоритму. Показник $D_N^m$ перевершує відповідний показник $\Lambda\Pi_\tau$-сітки в 1.1-1.5 раз.

Для випадку істотно неоднакового впливу параметрів на вихідний статистично змінний показник пропонується алгоритм двобічного ймовірного аналізу. Передбачається, що: задача ставиться у вигляді імітаційного моделювання, вихідний показник залежить від найбільш вагомого статистично змінного параметру монотонним чином, функції розподілу параметрів $\theta$ мають обмеження аргументів. Задача має вид:

$Q=\int\limits_G q(x)dx$; $G$ : $0\le x_j\le 1$; $q(x)=F_q(y(\theta_v(x),\theta_c,D))$; $\theta_v(x)=\varphi^{-1}(x)$;

$y(\theta_v,\theta_c,D)=F_y(\theta_v,\theta_c,D)$; $F_y$ : $R^{Lx+Lc+LD}\to R^1$ ; $\varphi^{-1}$ : $R^{Lx}\to R^{Lx}$ ;

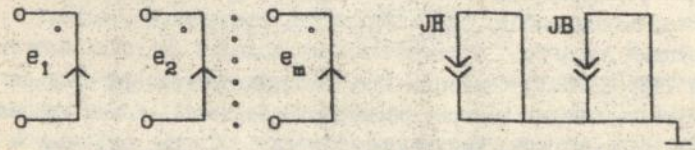
де $\theta_v,\theta_c$ - вектори статистично змінних та постійних параметрів, D-вектор ЗДФ, $\varphi(\theta)$-багатовимірна функція щільності розподілу $\theta$, $F_y$ - оператор моделі, $F_q$-оператор вихідного показника, Q-статистичний показник. Алгоритм відділяє суттєвий параметр $x_k$ за правилом : $k=\mathrm{index}(\max\limits_s|r_{yx_s}|)$,де $r_{yx_s}$- коефіцієнт кореляції між y та $x_s$. Далі визначаються підвектори $\hat{x}^-$ та $\hat{x}^+$ ( $\hat{x}=[x_1,\dots,x_{k-1},x_{k+1},\dots,x_m]^T$) за правилом: $x_j^-=0$ якщо $r_{yx_j}\ge 0$, $x_j^-=1$ якщо $r_{yx_j}<0$;$x_j^+=1-x_j^-$.Задача редукується до двох одновимірних задач: моделювання міноранти $y^-(x_k)$ та мажоранти $y^+(x_k)$ : $y^-(x_k)=y(x_k)|\hat{x}=\hat{x}^-$, $y^+(x_k)=y(x_k)|\hat{x}=\hat{x}^+$. По мі-

норанті та мажоранті формується інтервальне розширення статистичного показника Q: $Q \Rightarrow [Q^-, Q^+]$. Часто вдається перейти від чисельного моделювання типу Монте-Карло до аналітичного інтегрування. У цьому випадку опріч обчислювального виграшу досягається гарантія обмеженості інтервалу $[Q^-, Q^+]$. Доцільність пропонованого алгоритму доводиться практичними задачами ймовірного аналізу РЕА з ЗДФ: стає можливим аналітично формувати двобічну залежність надійності від D.

Третя глава містить моделі елементів схем, зображені у формі, погодженій з вимогами технології моделювання.

В першому параграфі наводяться узагальнені моделі та їх використання у технологічному процесі формування конструктивних моделей конкретних елементів. Узагальнена модель охоплює клас елементів, клас властивостей в межах одного елементу і зображається алгоритмічними блоками з невизначеними символьними параметрами. Процес формування моделей має два етапи конкретизації. На першому етапі конкретизуються структура схеми і тип функціональних залежностей . В результаті формується символьна модель, що охоплює клас елементів з однаковим числом полюсів і подібним алгоритмом функціювання. Другий етап формує чисельні значення параметрів, які визначають зовнішні характеристики конкретного елемента. Наводяться засоби технологічного процесу : підсистема ідентифікації компонентів (ПІК) та бібліотека узагальнених моделей.

В наступному параграфі наводиться узагальнена модель електромагнітних елементів у вигляді еквівалентного тороїдального трансформатора, осердя якого має площу перерізу S і довжину середньої лінії $l$. Напруга k-ї обмотки зображається у вигляді : $u_k = r_k i_k + L_k \partial i_k/\partial t + W_k S \partial B/\partial t$, $k=\overline{1,q}$, де $r_k, L_k, W_k, i_k$ - відповідно реактанс, індуктивність, кількість витків та струм k-ї обмотки. Цей вираз має узгоджену з ним еквівалентну схему (мал.2), де передбачено моделювання магнітної індукції B в залежності від напруженності магнітного поля в осерді H та часу t. Всі елементи зображуються однією узагальненою функцією $F_{трф}$.




$e_1 = F_{трф}(W_1, R_1, L_1, i_{JB}, i_{e_1})$; $JH = F_{трф}(W_1, W_2, \ldots, W_m, l, i_{e_1}, \ldots, i_{e_m})$;

...

$e_m = F_{трф}(W_m, R_m, L_m, i_{JB}, i_{e_m})$; $JB = F_{трф}(S, H_c, B_r, B_s, i_{JH})$;

Мал. 2. Схемна модель трансформатора

Головні вимоги до моделі - відображення широкого спектру властивостей та використання тільки паспортних даних. Для магнітом'яких осердь такими даними є: індукція насичення $B_s$, залишкова індукція $B_r$, коерцетивна сила $H_c$. Пропонується для моделювання петель гістерезису (часткових і повних ) застосувати розроблені сплайни. Практика моделювання схем ( за допомогою пакета програм ПРАМ-ПК ) доводить придатність таких моделей до складних задач (зокрема, моделювання керуємих вторинних джерел живлення). По мінімальній інформації моделюються криві в площині граничної петлі гістерезису.

Далі розглядається моделювання напівпровідникових приладів з точки зору компромісу між адекватністю та складністю. Як засіб дослідження використовуються результати роботи ПІК. Статичні характеристики $I_д(U_д)$ деяких класів діодів пропонується виражати, як

$$I_д = I_0\left(\exp[\theta(U_д - I_д R_д)] - 1\right)\left(1 + \alpha\left((U_д - I_д R_д)/(U_{д0} - (U_д - I_д R_д))\right)^m\right),$$

де $I_0$ - тепловий струм; $U_д$ - напруга на клемах діода; $R_д$ - реактанс тіла діода; $\alpha = \pm 1$ ( в залежності від типу ухилу характеристики від експоненти); $\theta, U_{д0}, m$ - параметри апроксимації. Наводяться приклади більшої адекватності цієї моделі стосовно існуючих виразів.

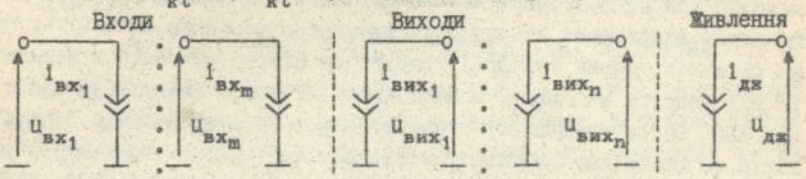
Залежність коефіцієнту підсилення по току $\beta$ від току колектору $I_к$ в моделі біполярного транзистору пропонується моделювати за допомогою розроблених сплайнів, безпосереднім аргументом яких є напруга база-емітер. Розглянутий засіб моделювання : гарантує інваріантність залежності $\beta(I_к)$ стосовно зміни інших параметрів; припускає явне визначення параметрів безпосередньо за графіками, має якісну відповідність реальним даним на всій зоні визначення.

Далі наводиться модифікація моделі МДН-транзистора, яка відрізняється від існуючих тим, що вплив підложки на порогову напругу та на межу між крутою і пологою зоною стокових характеристик розглядається незалежно. Збільшення міри варіювання параметрами робить модель здібною до відтворення характеристик групи послідовно сполучених МДН-транзисторів КМДН-мікросхем. Запропонована модель є базовою для формування макромоделей серійних мікросхем (564,590 та інших). Результати роботи ПІК стверджують ефективність моделі.

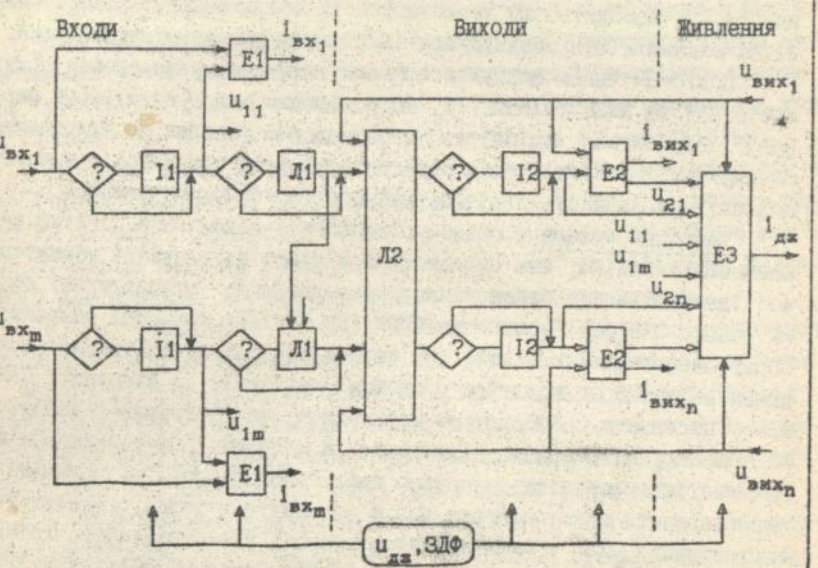
Наступний параграф містить систему моделей серійних цифрових мікросхем ТТЛ- та КМДН- технологій. Система моделей формується за допомогою узагальнених моделей обмеженої кількості. Кожна узагальнена модель охоплює один клас елементів однієї технології : комбінаційні елементи, тригери, лічильники, регистри.

Схемне зображення узагальненої моделі ( мал.3 ) містить мінімальну кількість залежних джерел струму, керуємих вектором зовніш-

ніх напруг u. Це приводить до мінімальної вимірності підматриці, що відповідає моделі мікросхеми, у базисі вузлових потенціалів. Мінімальне зображення забезпечує припустиму адекватність завдяки розгалуженій адаптивній структурі алгоритму обчислення змінних моделі (мал.4). Застосовуються уніфіковані блоки моделювання статичних електричних характеристик (Е1-Е3), логіки функціювання (Л1,Л2), інерційності (І1-І2) та адаптори (?), котрі визначають міру адекватності разом з мірою складності моделей.




Мал. 3. Схемна модель цифрових мікросхем




Мал.4. Структура алгоритмічної моделі цифрових мікросхем

Параметри блоків залежать від напруги джерела живлення $u_{дж}$ та ЗДФ. Моделювання інерційності здійснюється каскадним сполученням декількох блоків, кожний з яких алгоритмічно відтворює безінерційну

передаточну характеристику та інерційне коло першого порядку. Диференціальне рівняння стану останнього розв'язується аналітично за допомогою інтегралу Дюамеля. Такий засіб дозволяє при макромодельному зображенні досягти адекватності моделювання зовнішніх характеристик на рівні повної розгорнутої покомпонентої моделі.

Для моделювання ТТЛ мікросхем застосовуються розроблені багатовимірні сплайни. Модель зовнішніх кіл КМДН ІМС є згорткою струмів, обчислених за розробленою моделлю МДН-транзистора. Досить повне моделювання периферійних кіл та алгоритмічне зображення внутрішніх процесів відтворює: статичну та імпульсну перешкодостійкість; гонки сигналів; форми виходної напруги та струму живлення в залежності від напруги живлення, послідовності і форми вхідних сигналів та від ЗДФ. Оперативна зміна структур алгоритмів забезпечує ієрархічність та проблемну адаптацію моделей. За такою схемою розроблені моделі, що охоплюють переважну кількість елементів 155,564 та подібних серій. Апробація моделей в задачах моделювання РЕА з урахуванням ЗДФ доводить, що досягти успіху можливо тоді, коли різноманітна адекватність поєднується із схемною компактністю моделей.

Подібним чином формуються моделі мікросхем аналогових комутаторів МДН та КМДН технології, що розглядаються в наступному параграфі. Наводиться здібність пропонованих моделей до відображення специфічних ефектів - явищ перекрить та розривів каналів в часовій області, що залежать від електричного та теплового режимів.

**Четверта глава** є описом розробленої підсистеми ідентифікації компонентів (ПІК), яка складається з трьох підсистем : параметричної ідентифікації; статистичного моделювання; статистичної обробки даних. ПІК реалізовано на ПЕОМ IBM PC (EGA,VGA) без обмежень на обсяг оперативної пам'яті, яка розподіляється динамічно за обсягом даних задач. Розглядаються принципи реалізації та адаптації ПІК до вимог споживача. Наводиться математичне та програмне забезпечення ПІК на грунті розроблених методів та моделей. Обчислювальне ядро ПІК має інваріантність стосовно предметної галузі, що дозволяє використовувати пакет програм для різноманітних задач. Аналізується застосування ПІК в задачах автоматизації схемотехнічного проектування та випробувань виробів РЕА при ЗДФ. Як в автоматичному, так і в інтерактивному режимі ПІК дозволяє: ідентифікувати параметри моделей за даними технічних умов (ТУ) та даними випробувань і оцінювати відхилення моделей в декількох метриках; досліджувати ймовірні властивості груп елементів ( надійність, чутливість вихідних параметрів елементів стосовно деградації внутрішніх параметрів) в діапазонах електричних режимів та ЗДФ; візуалізувати сім'ї харак-

теристик елементів; відтворювати повний комплект параметрів ТУ на елемент в нестандартних режимах ЗДФ. Наводяться приклади застосування ПІК в складі САПР бортової апаратури в комплексі з пакетом схемотехнічного моделювання ПРАМ-ПК та базою даних. Використання ПІК та розроблених за його допомогою моделей має апробацію в задачах аналізу радіаційної стійкості блоків РЕА широкого класу. Додатково до схемотехнічного аналізу розглядаються можливості ПІК в обчислювальній математиці, прикладній статистиці, фізиці.

В **закінченні** зводяться головні результати роботи.

**Додаток** містить акти впровадження результатів дисертації.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Запропоновано метрику нев'язки моделі та об'єкта у вигляді відстані між дискретною та неперервною множинами. Метрика : погоджує похибки вимірювань та обчислювань; фільтрує випадкові викиди від обумовлених відхилень; надає зворотність оцінки щодо вибору змінних, за якими обчислюється нев'язка. Ці властивості набувають вагу для нелінійних моделей з істотно різними крутизнами функції.

2. Розроблено багатовимірні сплайни для практичних задач апроксимації та інтерполяції. Сплайни гарантують відсутність осциляцій (навіть для рідкої сітки), мають явний відносно параметрів вид та узгоджуються з практичними характеристиками елементів схем.

3. Розроблено адаптивний метод мінімізації суми квадратів з двобічними обмеженнями на параметри. Метод : ефективно поєднує гарантію загальної релаксації мінімізуємої функції з ймовірною високою збіжністю методів з повними кроками; має алгоритмічну надійність для яристих, поганообумовлених та вироджених задач.

4. Запропоновано алгоритм генерації векторів квазівипадкових чисел для задач з незначними обсягом виборки та складом статистично варіючих параметрів. Алгоритм водночас: має підвищену рівномірність розподілу в єдиничному гіперкубі; гарантує відсутність кореляцій компонент вектора; забезпечує максимальну покоординатну рівномірність. Ці властивості мають присутність і для рідкої сітки.

5. Для типових практичних умов розроблено алгоритм двобічного ймовірного аналізу. В алгоритмі враховується різниця впливу окремих параметрів на вихідний показник, що дає змогу поєднати властивості методу Монте-Карло і методу найгіршого випадку. Як наслідок підвищується вірогідність, знижуються витрати часу, в окремих випадках можливо перейти від чисельних методів до аналітичних.

6. Розроблено технологічний процес оперативного формування моделей заходом параметризації узагальненої моделі. Узагальнена

модель охоплює клас елементів та клас властивостей в межах одного елементу. Її використання дозволяє : знизити час формування нових моделей; скоротити обсяг бібліотек моделей; уніфікувати зображення моделей; підвищити алгоритмічну надійність; адаптувати моделі .

7. В моделях поширених елементів схем реалізовані засоби відображення режимних залежностей характеристик. Підвищена адекватність моделювання елементів дозволяє при моделюванні схем РЕА відобразити специфічні явища, що виникають в реальних умовах.

**Основні результати дисертації відображені в публікаціях :**


1. Зубчук В.И., Микульченко О.И. Аналитическая нелинейная модель транзистора// Автоматизация проектирования в электронике: Респ. межвед.науч.-техн.сб.-1984.-Вып.30,С.94-96.
2. Микульченко О.И. Формальная модель КМДП-структуры // Автоматизация проектирования в электронике: Респ.межвед.науч.-техн.сб.-1985.-Вып.31,С.86-91.
3. Зубчук В.И., Микульченко О.И. Модели интегральных схем аналоговых коммутаторов // Радиоэлектроника.-1986.-N6.-С.71- 75. (Изв. высш.учеб.заведений).
4. Зубчук В.И., Евтухова И.Я., Микульченко О.И. Обобщенная модель регистра // Автоматизация проектирования в электронике: Респ. межвед.науч.-техн.сб.-1987.-Вып.37,С.50-58.
5. Зубчук В.И.,Микульченко О.И. Оперативное моделирование цифровых интегральных схем // Аннотированная программа шк.-сем. " Методы автоматизированного проектирования ЭВА и СБИС".-Винница.-1988.-С.19.
6. Зубчук В.И.,Евтухова И.Я.,Микульченко О.И. Обобщенные адаптивные модели цифровых интегральных микросхем //Радиоэлектроника.-1988.-N6.-С.72- 78. (Изв.высш.учеб.заведений).
7. Диденко А.К., Евтухова И.Я., Зубчук В.И., Микульченко О.И. Подсистема оперативного формирования моделей компонентов для САПР РЭА//Проектирование и исследование полупроводниковых и электромеханических преобразователей.- Киев,изд-во ИЭД АН УССР.-1989.-С.139-144.
8. Диденко А.К., Евтухова И.Я., Зубчук В.И., Микульченко О.И. Оперативное формирование моделей электронных компонентов // Автоматизация проектирования в электронике: Респ.межвед.науч.-техн. сб.-1990.-Вып.41,С.60-65.
9. Микульченко О.И. Алгоритм моделирования инерционности цифровых интегральных схем // Электронное моделирование.- 1990.- N2. - С. 64-65.

10. Микульченко О.И. Сплайн-функции для оперативного моделирования нелинейных элементов // Радиоэлектроника.-1990.-N6. -С.81- 83. (Изв.высш.учеб.заведений).
11. Верхотуров В.И., Евтухова И.Я., Микульченко О.И. Моделирование КМОП интегральных микросхем с учетом радиационных воздействий // Радиационная стойкость бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов: Тр. 1-й всесоюзной конф.-Томск, изд-во НИИ интроскопии,1991.-С. 228-229.
12. Верхотуров В.И.,Диденко А.К., Захаронко А.И., Микульченко О.И. Технология оперативного моделирования цифровых интегральных микросхем с учетом внешних воздействующих факторов // Радиационная стойкость бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов : Тр. 1-й всесоюзной конф. -Томск, изд-во НИИ интроскопии,1991.-С. 230-231.
13. Евтухова И.Я., Зубчук В.И., Микульченко О.И. Обобщенная макромодель ТТЛ-регистров// Автоматизация проектирования в электронике: Респ.межвед.науч.-техн.сб.-1992.-Вып.46,С.98-103.
14. Верхотуров В.И., Графодатский О.С.,Диденко А.К.,Евтухова И.Я., Зубчук В.И., Микульченко О.И. Построение САПР бортовой радиоэлектронной аппаратуры КА с учетом радиационных воздействий //Электрон. техника, сер.8, вып.4-5 (151-152),1992.-С.3-28.
15. Верхотуров В.М., Графодатский О.С.,Диденко А.К.,Евтухова И.Я., Зубчук В.И., Микульченко О.И. Исследование устойчивости КА к воздействию факторов космического пространства средствами САПР // Проблемы взаимодействия космических летательных аппаратов с космической средой : Тр. 1-й междун. конф. -Новосибирск, изд-во СО АН России,1992.-С.17.
16. Микульченко О.И. Адаптивный метод оптимизации с релаксацией целевой функции на нескольких шагах // Проблемы автоматизированного моделирования в электронике. - К.: Общество "Знание" Украины, 1993.-С. 38-39.

НВЛ ПФ КПП 1993. Зам. 712 — 100.