ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

*На правах рукопису*

**МЕЛЬНИК**
**Богдан Кирилович**

# ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ДИСКРЕТНИХ МАКРОМОДЕЛЕЙ АНАЛОГОВИХ КОМПОНЕНТ ЕЛЕКТРОННИХ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

Спеціальність 05.09.05 - Теоретична електротехніка

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів - 1996 р.

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теоретичних основ електрорадіотехніки Львівського державного університету ім. І.Франка.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор
**Стахів Петро Григорович**

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук **Бунь Ростислав Адамович;**
- кандидат технічних наук, доцент
**Воробкевич Андрій Юліанович.**

Провідна установа - **Інститут проблем моделювання в енергетиці НАН України**, м. Київ.

Захист дисертації відбудеться "28" березня 1997р. о 12⁰⁰ год на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 04.06.19 при Державному університеті "Львівська політехніка" за адресою: 290646, Львів-13, вул. С. Бандери, 12.

Відгуки на автореферат у двох примірниках, завірені печаткою, просимо надсилати на адресу: 290646, Львів-13, вул.С.Бандери,12, Державний університет "Львівська політехніка", вченому секретарю ради Д 04.06.19.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Державного університету "Львівська політехніка" (вул. Професорська, 1)

Автореферат розісланий "27" лютого 1997 р.

Вчений секретар
спеціалізованої Вченої ради О.І. Шегедин

# ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність проблеми.** У сучасних умовах для успішного розвитку електрорадіотехніки важливе значення має розробка автоматизованих систем аналізу та проектування компонент електронних та електричних кіл з високими ступенями інтеграції та мініатюризації їхніх складових частин. Найбільш ефективним підходом є використання принципів макромоделювання, коли згадані компоненти описують на основі динаміки їхніх зовнішніх змінних, а також принципу "чорної скриньки", коли дослідник абстрагується від особливостей їхньої схемної реалізації. Використання у сучасних електротехнічних колах як аналогових, так і цифрових елементів, а також необхідність застосування для дослідження їхньої роботи ЕОМ потребує переходу до дискретного моделювання. Підвищений інтерес до дискретних макромоделей пояснюється зокрема дискретним характером вихідної інформації, на базі якої виконують моделювання. Відмова від використання як проміжної ланки неперервних макромоделей дає змогу спростити процес побудови математичних моделей складних електронних чи електричних кіл шляхом вилучення процедур початкової апроксимації вихідних сигналів та зворотної дискретизації змодельованих реакцій. Отже, одним із центральних питань розрахунку сучасних електронних та електричних кіл є розробка методик побудови дискретних макромоделей та їхня параметрична ідентифікація.

Сьогодні розроблено велику кількість методів ідентифікації лінійних макромоделей, які грунтуються на відомих методах теорії лінійних систем. Значний внесок у розвиток методів моделювання та ідентифікації зробили В.Г.Максимович, В.П.Сігорський, П.А.Іонкін, П.Г.Стахів, Л.А.Синицький, Р.Калман, Л.О.Чуа, Л.Льюнг .а багато інших. Однак дотепер недостатню увагу звертали на побудову макромоделей у вигляді "чорної скриньки". Крім того, актуальними є питання розробки алгоритмів та їхньої ефективної програмної реалізації щодо побудови дискретних макромоделей низького порядку, а особливо для аналогових багатополюсників.

Для побудови нелінійних макромоделей найчастіше використовують функціональні ряди і поліноми. Зокрема, цей підхід застосовано у працях Л.П. Данілова, С.А. Букашкіна, Г.Є. Пухова, А.А.Ланне, С.Н.Басана, С. Рау, Т. Седенстрема та ін. При цьому доволі складно шукати ядра Вольтерра, особливо у багатомірному випадку. Крім того, застосування таких макромоделей є досить обмежене. Серед причин цього є: вузький клас сигналів, на якому макромодель справедлива; погане узгодження методів їхньої ідентифікації з відомими методами ідентифікації лінійних макромоделей; труднощі спільного використання лінійних та нелінійних макромоделей, побудованих за різною методикою.

Найзручнішим з погляду формалізації алгоритмів ідентифікації їхніх параметрів є метод побудови макромоделей у просторі змінних стану. Такий підхід дає змогу використати низку класичних результатів, отриманих у теорії лінійних систем. Що ж до нелінійного випадку, то згаданий тип макромоделей дає змогу апроксимувати нелінійні характеристики поліномами низького порядку. Однак перехід від лінійних до нелінійних макромоделей у процесі їхньої побудови поки що не досліджували.

А тому актуальною є тема дисертаційної роботи, присвяченої розробці та реалізації універсальної методики ідентифікації параметрів лінійних і нелінійних дискретних макромоделей аналогових багатополюсних компонент електронних та електричних кіл, побудованих у просторі змінних стану за принципом "чорної скриньки", які працюють на широкому класі сигналів.

**Мета роботи** - розробка та програмна реалізація ефективної методики ідентифікації параметрів лінійних і нелінійних дискретних макромоделей аналогових багатополюсних компонент електронних та електричних кіл за даними про зміну сигналів на їхніх полюсах.

Для досягнення визначеної мети були вирішені такі завдання:

- побудовані алгоритми ідентифікації лінійних та білінійних макромоделей у формі дискретних рівнянь стану;
- розроблена методика ідентифікації нелінійних макромоделей зада-

ної структури;

- забезпечено достатню точність відтворення змодельованих сигналів у випадку пониження порядку макромоделей;
- розроблено програмне забезпечення ідентифікації макромоделей динамічних багатополюсників;
- побудовані дискретні макромоделі конкретних аналогових багатополюсних компонент електронних кіл.

**Достовірність** основних наукових положень та одержаних результатів забезпечує коректне формулювання розглянутих завдань, використання апробованих методів для їхнього розв'язання; добре узгодження отриманих макромоделей з результатами фізичних та чисельних експериментів, дослідження їх на різних класах сигналів, а також порівняння з результатами інших авторів.

**Методи дослідження**. Для вирішення поставлених завдань у роботі використані методи теорії електричних кіл, теорії ідентифікації систем, лінійної алгебри, обчислювальної математики та програмування, оптимізації, чисельного аналізу електричних кіл, а також методи фізичного та чисельного експериментального дослідження електронних кіл.

**Наукова новизна роботи** така:

- розроблена методика побудови лінійної дискретної макромоделі багатополюсних аналогових компонент електронних та електричних кіл низького порядку з гарантованою точністю відтворення сигналу, яка грунтується на оптимізаційному підході;
- розроблена методика ідентифікації параметрів нелінійної макромоделі з чітко відокремленою лінійною частиною;
- створені алгоритми та пакет програм для реалізації вказаних методик, на основі яких побудовані макромоделі конкретних компонент електронних кіл.

**Основні положення, що виносяться на захист:**

- теорія й обгрунтування процедур ідентифікації дискретних лінійних і нелінійних із заданою структурою макромоделей багатополюсних компонент електронних і електричних кіл;

- методика зниження порядку макромоделі та забезпечення необхідної точності моделювання;
- програмна та чисельна реалізація ідентифікаційних процедур макромоделей реальних багатополюсних компонент електронних кіл на базі розроблених алгоритмів.

**Практична цінність.** Розроблені методи, алгоритми й пакет програм для ідентифікації лінійних і нелінійних дискретних макромоделей аналогових багатополюсних компонент електронних та електричних кіл. Запропоновану методику можна використати для моделювання й аналізу електричних та електронних схем, а програмне забезпечення застосувати як складову частину існуючих САПР. Побудовані макромоделі конкретних багатополюсних компонент електронних кіл можна ввести в фонд бібліотек з метою їх подальшого використання розробниками радіоелектронної апаратури.

**Реалізація результатів роботи.** Результати дисертаційної роботи використані під час виконання госпдоговірної темч ФТ 88-89 "Розробка пакета програм розрахунку критичних режимів радіоелектронних схем", а також впроваджені у виробництво на деяких підприємствах колишнього Мінрадіопрому СРСР і відображені у звіті з держбюджетної теми ФТ 510-Б "Побудова систем цифрової обробки інформації на базі сигнальних процесорів TMS-320".

**Апробація результатів роботи.** Основні положення дисертації та результати досліджень доповідалися та обговорювались на Всесоюзній школі-семінарі "Діагностування, надійність, неруйнівний контроль електронних пристроїв та систем" (Владивосток, 1990), 13-ій Республіканській науково-технічній конференції "Проблеми автоматизованого моделювання в електроніці" (Київ, 1993), школі-семінарі "Теоретична електротехніка, моделювання та електроніка" (Львів-Шацьк, 1993), Ювілейній науковій конференції присвяченій 40-річчю фізичного факультету ЛДУ ім. І.Франка (Львів, 1993), міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми фізичної та біомедичної електроніки" (Київ, 1995, 1996), 1-ій Міжнародній науково-технічній конференції "Математичне моделювання в елек-

тротехніці й електроенергетиці" (Львів, 1995), Другій українській конференції з автоматичного керування "Автоматика - 95" (Львів, 1995), а також на наукових семінарах кафедри теоретичних основ електрорадіотехніки ЛДУ ім. І.Франка (1992-1996).

**Публікації**. За результами дослідження опубліковано десять праць у різних періодичних виданнях, з них без співавторів - дві.

**Структура й обсяг роботи**. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів з висновками, підсумків, списку використаної літератури та додатків. Робота містить 120 сторінок машинописного тексту, в тому числі 10 рисунків та 7 таблиць. Бібліографічний список складається із 125 назв на 11 сторінках. Додатки на 2 сторінках.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обгрунтовано важливість та актуальність питань, вирішенню яких присвячена дисертація. Наведено короткий огляд літератури з вибраної проблематики. Визначений об'єкт досліджень. Сформульована мета роботи, наукова новизна, а також основні положення, які виносяться на захист. З'ясовано короткий зміст усіх розділів дисертації.

У **першому розділі** дана загальна характеристика існуючих підходів побудови макромоделей багатополюсних компонент електронних та електричних кіл (КЕЕК).

Розглянуто динамічний багатополюсник з $n$ входами та $m$ виходами. Для нього визначені залежні від часу $t$ $n$-мірний вектор вхідних змінних $u(t)$, $m$-мірний вектор вихідних змінних $y(t)$ та $p$-мірний вектор додаткових змінних $x(t)$. Усі змінні не характеризують безпосередньо процеси всередині КЕЕК і тому є зовнішніми.

Макромоделлю багатополюсника, що розглядається, називається операторне рівняння виду

$$Q(u(t),y(t),x(t)) = 0, \qquad (1)$$

яке має такі властивості:

1) оператор $Q$ визначений і при будь-яких векторах $u(t)$ та $x(t)$ з області допустимих значень рівняння (1) має єдиний розв'я зок;
2) виконується нерівність

$$\| \bar{y}(t) - y(t) \| < \varepsilon, \qquad (2)$$

де $y(t)$ - розв'язок (1), $\bar{y}(t)$ - вектор змодельованих вихідних змінних; $\varepsilon > 0$ - достатньо мале число, яке характеризує точність моделювання.

У випадку дискретних макромоделей вектори зовнішніх змінних визначені лише в окремі моменти часу і, отже, є функціями змінної $k$ ($k = 1,2,3,...$).

Звернуто увагу на переваги дискретної макромоделі динамічного багатополюсника в просторі змінних стану, загальний вигляд якої такий:

$$x^{(k+1)} = f(x^{(k)}, u^{(k)});$$
$$y^{(k)} = g(x^{(k)}, u^{(k)}), \quad k=1,2,3,..., \qquad (3)$$

де $x^{(k)}$ - вектор змінних стану в $k$-й точці, $f(.)$, $g(.)$ - деякі вектор-функції відповідних вимірів. Розмірність вектора $x^{(k)}$ визначає порядок макромоделі. Зменшення порядку поряд із забезпеченням необхідної точності макромоделі є одним із найважливіших завдань, які виникають в процесі моделювання.

Наведена класифікація дискретних макромоделей змінних стану. Визначені їхні основні види, які найчастіше використовують для моделювання.

У другому розділі розглянуто алгоритм Хо-Калмана ідентифікації параметрів лінійної дискретної макромоделі виду

$$x^{(k+1)} = Fx^{(k)} + Gu^{(k)};$$
$$y^{(k)} = Cx^{(k)}, \qquad k=1,2,3,\ldots \tag{4}$$

Метою ідентифікації є визначення всіх елементів дійсних матриць F, G, C, що є параметрами макромоделі.

Застосування алгоритму Хо-Калмана в більшості випадків приводить до макромоделі надто високого порядку. Для усунення цього недоліку необхідно замінити точну макромодель, отриману згідно з згаданим алгоритмом, приблизною макромоделлю меншого порядку, наперед припускаючи похибку, яку контролюють.

Алгоритм Хо-Калмана передбачає сингулярний розклад побудованої на базі експериментальних вхідних даних блокової матриці Генкеля. Кількість отриманих таким чином ненульових сингулярних чисел визначає порядок макромоделі. Очевидно, що, вилучаючи з подальшого розгляду деяку кількість цих чисел, ми зменшуємо і порядок. Для забезпечення максимальної точності моделі необхідно, щоб на наступних етапах алгоритму використовувались лише найбільші сингулярні числа, які за допомогою оптимізаційних процедур коректують з метою мінімізації похибки моделювання, яка виникає внаслідок ігнорування впливу відкинутих чисел. Кількість ненульових сингулярних чисел зменшується поступово, що дає змогу контролювати похибку. Таким чином у процедурі передбачено можливість заздалегідть визначити межі похибки моделювання.

Сформульовану оптимізаційну задачу розв`язують за допомогою методів нелінійного програмування. Для цього формують функцію мети

$$W(s) = \sum_{i=1}^{n} \left\| \bar{y}^{(i)} - y^{(i)} \right\|, \tag{5}$$

де $y^{(i)}$ і $\bar{y}^{(i)}$ - і-ті дискрети вихідних сигналів відповідно початково побудованої й апроксимуючої макромоделі; s - вектор аргументів

функції мети, який формується з сингулярних чисел, які коректують. Норма в (5) визначається таким чином:

$$\|\bar{y}^{(i)} - y^{(i)}\| = \begin{cases} 0, & |\bar{y}^{(i)} - y^{(i)}| < \varepsilon; \\ (|\bar{y}^{(i)} - y^{(i)}| - \varepsilon)^2, & |\bar{y}^{(i)} - y^{(i)}| > \varepsilon, \end{cases} \qquad (6)$$

де $\varepsilon > 0$ - задана точність макромоделювання.

Задачу нелінійного програмування, яка виникає в цьому випадку, розв`язують за допомогою відомої процедури глобальної пошукової оптимізації, що грунтується на методі напрямного конуса.

У третьому розділі розглянуто два підходи щодо ідентифікації окремого класу нелінійних макромоделей, а саме: білінійних макромоделей виду

$$x^{(k+1)} = Fx^{(k)} + Gu^{(k)} + Nx^{(k)}u^{(k)};$$
$$y^{(k)} = Cx^{(k)}, \qquad k=1,2,3,.... \qquad (7)$$

Ідея першого підходу полягає в такому. Сукупність матричних коефіцієнтів (7) - F, G, N, C - можна виразити через послідовність матриць $W_k$, $k=1,2,3,...$, яка еквівалентна оператору відображення вхід-вихід, а саме:

$$W_k = CZ_k, \qquad (8)$$

де: $Z_k = [FZ_{k-1} \;\; NZ_{k-1} \;\; G]$, $k=2,3,...$, $Z_1 = G$. (9)

На базі даних про вхідні та вихідні сигнали шляхом поетапного розв'язування лінійних систем, використовуючи оптимізаційні процедури щодо вільних змінних, які вводяться з метою усунення

недовизначеності цих систем, визначають усі елементи матричної послідовності $W_k$, $k=1,2,3,...$ Багатоетапність та поступовість такого пошуку дає змогу значно спростити реалізацію цієї процедури, особливо під час моделювання багатополюсників. Повністю визначена таким чином послідовність $W_k$, $k=1,2,3,...$ є основою для пошуку параметрів макромоделі (7) згідно з відомомим алгоритмом Ісідорі.

Другий підхід позбавлений громіздких обчислень, на відміну від першого, а головне, його можна застосувати для ідентифікації відмінних від (7) видів макромоделей з чітко відокремленою лінійною частиною. Суть цього підходу полягає у розбитті процедури ідентифікації нелінійної макромоделі на два послідовні етапи.

На початковому етапі побудови нелінійної макромоделі (7) приймають, що значення елементів матриці **N** дорівнюють нулю і на базі відомої матриці Генкеля, отриманої в режимі малого сигналу, будують згідно з процедурою, описаною вище, лінійне наближення (4), тобто визначають матриці **F**, **G**, **C**. На цьому етапі досягають мінімально можливого порядку макромоделі.

На другому етапі, використовуючи масиви вхідних даних, які відповідають нелінійному режимові багатополюсника, що моделюється, тобто отримані під час збурення його великими вхідними сигналами, та застосовуючи оптимізаційні процедури ідентифікації, обчислюють оптимальні значення матриці **N**, які забезпечують мінімальну сумарну похибку для нелінійної макромоделі (7). На цьому етапі вектор аргументів в функції мети (5) формується з елементів матриці **N** і решти матриць (7), або деяких з них.

Використання на обидвох етапах однотипних оптимізаційних процедур дає змогу значно спростити реалізацію розглянутого алгоритму побудови нелінійної макромоделі.

У **четвертому розділі** наведені приклади застосування розроблених методик ідентифікації лінійних та білінійних макромоделей для конкретних багатополюсних компонент електронних кіл. Зокрема, розглянуто процедуру ідентифікації дискретної лінійної макро-

моделі виду (4) операційного підсилювача (ОП) серії К140УД6, увімкнутого за стандартною схемою (рис. 1). Як вхідні дані для індентифікації брали дискретизовані з кроком 50 нС значення вихідних аналогових сигналів $I_{вх}$ та $V_{вих}$, отримані в результаті збурення стрибкоподібними вхідними сигналами з амплітудами стрибків $V_{вх}$ - 0,4 В та $I_{вих}$ - 3,93 мА.

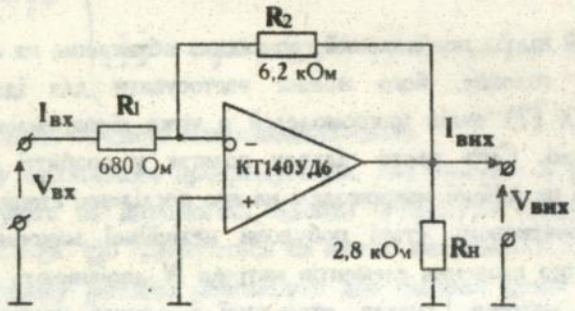


**Рис. 1.** Схема увімкнення мікросхеми КТ140УД

У результаті застосування алгоритму Хо-Калмана побудована точна макромодель виду (4) 19-го порядку. Шляхом одночасного вилучення з процедури ідентифікації восьми сингулярних чисел блокової матриці Генкеля, утвореної з вхідних даних, отримана приблизна макромодель 11-го порядку. Максимальна похибка цієї макромоделі становила 14,9%, а середньоквадратична - 6,9%. Застосування оптимізаційних процедур дало змогу звести похибки до десятих відсотка. Далі порядок зменшували поступово шляхом почергового вилучення одного з сингулярних чисел і застосування оптимізаційних процедур щодо залишених. Таким чином отримано остаточну макромодель ОП п`ятого порядку, похибки моделювання якої становили: максимальна - 4,3%, середньоквадратична - 3,1%.

Незважаючи на те, що для ідентифікації використовували стрибкоподібні вхідні сигнали, макромодель дійсна і для сигналів інших видів. На рис.2 показано змодельовану та реальну реакції ОП

на гармонічне збурення. Зсув фаз між ними, залежно від частоти вхідних сигналів, не перевищує в досліджуваному діапазоні $20^0$.

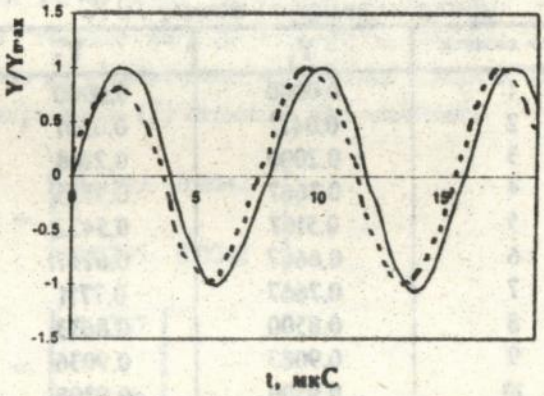


**Рис.2.** Реальна та змодельована реакції ОП на гармонічний сигнал

У роботі розглянуто також процедуру ідентифікації білінійних дискретних макромоделей підсилювача потужності низької частоти та аналогового перемножувачала сигналів (АПС), реалізованих на базі інтегральних схем серій відповідно К174УН14 та КР525ПС2А
На схемному рівні АПС розглядали як триполюсник з двома вхідними сигналами - напругами на входах ($v_1$ і $v_2$), та одним вихідним - напругою на виході ($v_{вих}$). Для макромоделі (7) брали, що

$$u^{(k)}=v_1^{(k)}\ v_2^{(k)},\ k=1,2,3,... \qquad (10)$$

Згідно з запропонованою методикою ідентифікація білінійної макромоделі виду (7) відбувалася за два етапи, на першому з яких визначали лінійне наближення виду (4). Як вихідні дані для побудови лінійного наближення брали дискретні значення вихідного сигналу АПС під час збурення його входів стрибкоподібними сигнала-

ми, що отримані експериментальним шляхом і зведені в таблиці 1 (набір даних $Y_1$).

**Таблиця 1**

Дискрети вихідного сигналу АПС

| номер дискрети | $Y_1$ | $Y_2$ |
|---|---|---|
| 1 | 0,0000 | 0,0000 |
| 2 | 0,0417 | 0,0301 |
| 3 | 0,2000 | 0,2108 |
| 4 | 0,3667 | 0,3735 |
| 5 | 0,5167 | 0,5422 |
| 6 | 0,6667 | 0,6747 |
| 7 | 0,7667 | 0,7711 |
| 8 | 0,8500 | 0,8633 |
| 9 | 0,9083 | 0,9036 |
| 10 | 0,9500 | 0,9398 |
| 11 | 0,9833 | 0,9759 |
| 12 | 1,0000 | 0,9939 |
| 13 | 1,0000 | 1,0000 |
| 14 | 1,0000 | 1,0000 |

У результаті першого етапу ідентифікації отримано лінійну макромодель (4) другого порядку з матрицями

$$F = \begin{vmatrix} 0,8729 & -0,4707 \\ 0,1295 & 0,4390 \end{vmatrix}$$

$$G = \begin{vmatrix} -0,5444 \\ -0,2400 \end{vmatrix}$$

$$C = \begin{vmatrix} -0,3326 & -0,5325 \end{vmatrix} \qquad (11)$$

У цьому випадку середньоквадратична похибка щодо значень вихідних сигналів, отриманих у режимі малого збурення, становила 1% при максимальній 2,3%.

Після застосування оптимізаційних процедур другого етапу ідентифікації стосовно матриць G і N, проведених з урахуванням вхідних даних, що відповідають нелінійному режимові (набір $Y_2$), ці матриці в макромоделі (7) отримали такі значення:

$$N = \begin{vmatrix} -0{,}0399 & 0{,}0042 \\ -0{,}0285 & 0{,}0042 \end{vmatrix}$$

$$G = \begin{vmatrix} -0{,}6267 \\ -0{,}3038 \end{vmatrix} \qquad (12)$$

Середньоквадратична і максимальна похибки нелінійної макромоделі відповідно дорівнюють 1,4 і 4,0%.

У **підсумках** сформульовані основні результати, які отримані в дисертаційній роботі.

У **додатках** наведено документи, які засвідчують впровадження результатів дисертаційної роботи.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Модифіковано запропонований Хо і Калманом алгоритм побудови лінійних макромоделей динамічних багатополюсників шляхом застосування оптимізаційних процедур, що дає змогу суттєво зменшити порядок макромоделі.
2. Удосконалено запропонований Ісідорі алгоритм побудови білінійної макромоделі, що дало змогу спростити його завдяки поетапній реалізації процедури ідентифікації, а також поширити його застосування на багатомірний випадок.

3. Запропонований алгоритм ідентифікації нелінійних макромоделей у базисі змінних стану заданої структури з чітко відокремленою лінійною частиною, в якому застосовується оптимізаційний підхід щодо визначення параметрів нелінійної частини. Розроблені практичні рекомендації щодо застосування алгоритму.
4. Побудовані лінійні і нелінійні дискретні макромоделі підсилювачів, реалізованих на реальній елементній базі, які гарантують задану точність відтворення сигналу.
5. Побудована дискретна макромодель суттєво нелінійного багатополюсного елемента електронних кіл - аналогового перемножувача сигналів в інтегральному виконанні.
6. Створено програмне забезпечення для реалізації процедур ідентифікації параметрів лінійних і нелінійних макромоделей.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ВИКЛАДЕНІ В ТАКИХ ПРАЦЯХ:

1. *Стахив П.Г., Мельник Б.К.,Джала В.Р.* Построение дискретных макромоделей нелинейных динамических объектов с многими входами // Электронное моделирование. - 1996. - Т. 18. - №3- С.89-91.
2. *Мельник Б.К., Стахів П.Г.* Алгоритм побудови білінійних макромоделей багатополюсних елементів електронних схем // Теоретична електротехніка. - 1995. - №52. - С.94-98.
3. *Стахів П.Г., Мельник Б.К., Джала В.Р.* Використання оптимізаційного підходу для побудови нелінійних макромоделей багатополюсних компонент електронних кіл у базисі змінних стану // Теоретична електротехніка. - 1996. - Вип. 53. - С. 29-35.
4. *Мельник Б.К., Стахив П.Г.* Некоторые дискретные макромодели операционных усилителей //Тр. Всесоюз. школы-семинара "Диагностирование, надежность, неразрушающий контроль электронных устройств и систем". - Владивосток, 1990. - С.114.

5. *Мельник Б.К., Стахів П.Г.* Нелінійні дискретні макромоделі деяких багатополюсних компонент електронних кіл// Тр.13-ой Респ. науч.-техн. конф. "Проблемы автоматизированого моделирования в электронике".- К., 1993.- С.40-41.

6. *Джала В.Р., Мельник Б.К.* Застосування модифікованого методу глобальної пошукової оптимізації для побудови нелінійних дискретних макромоделей багатополюсних компонент електронних кіл // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. "Проблемы физической и биомедицинской электроники". - К., 1995.- С.65-66.

7. *Мельник Б.* Модифікація ідентифікаційного алгоритму Калмана для побудови лінійних дискретних макромоделей // Праці 1-ї Міжнарод. наук.-техн. конф. "Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці". - Львів, 1995.- С.64.

8. *Стахів П., Мельник Б., Джала В.* Деякі аспекти використання оптимізаційного підходу до ідентифікації параметрів нелінійних динамічних систем//Праці Другої української конференції з автоматичного керування "Автоматика-95". - Львів, 1995. - Т.2. - С.54-55.

9. *Стахів П.Г., Мельник Б.К.* Побудова дискретних макромоделей лінійних і нелінійних багатополюсних компонент електронних кіл // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. "Проблемы физической и биомедицинской электроники". - К., 1996.- С.289-291.

10. *Мельник Б.К.* Нелінійні дискретні макромоделі деяких багатополюсних компонент електронних кіл // Праці Ювілейної наук. конф., присвяченої 40-річчю фіз. ф-ту ЛДУ ім.І. Франка. Секція "Радіофізика". - Львів, 1993.- С.24.

**Особистий внесок.** Усі результати, що становлять основний зміст дисертації, автор отримав самостійно. В публікаціях, написаних у співавторстві, дисертантові належать: у працях [8] та [9] - методика зниження порядку лінійної макромоделі на базі оптимізаційного підходу, у праці [2] - методика поетапної реалізації процедури ідентифікації білінійної макромоделі багатополюсника, у працях

[1], [3], [6] - методика ідентифікації нелінійних макромоделей заданої структури, у працях [4] та [5] - алгоритми програм для реалізації процедур ідентифікації параметрів лінійних і нелінійних макромоделей та результати моделювання.

**Аннотация:** Мельник Б.К. Идентификация параметров дискретных макромоделей аналоговых компонент электронных и электрических цепей. Диссертация в виде рукописи на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.05 - теоретическая электротехника. Государственный университет "Львовская политехника", Львов, 1996.

Разработана методика идентификации параметров линейных и нелинейных дискретных макромоделей в пространстве состояний аналоговых многополюсников. При построении линейных макромоделей предложено с целью уменьшения порядка использовать оптимизационные процедуры, которые позволяют контролировать ошибку моделирования. В случае нелинейных макромоделей предлагается сперва строить линейное приближение, а затем на основании подобных оптимизационных процедур постепенно вводить в структуру макромодели нелинейные элементы. С помощью предложенных подходов разработан программный комплекс для построения макромоделей реальных компонент электронных и электрических цепей. Данный комплекс апробирован при моделировании линейных и нелинейных режимов работы электронных приборов в интегральном исполнении.

**Abstract:** Melnyk B.K. Identification of parameters of discrete macromodels of analog components of electronic and electrical circuits. Dissertation (Ph.D.Thesis) for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences on the speciality 05.09.05 - Theoretical electrical engineering. State University "Lviv Politechnic", Lviv, 1996.

Parameter identification of linear and nonlinear discrete macromodels in state space (which correspond to analog multipoles) is

proposed. Using optimization procedure the degree of linear discrete macromodel is reduced. Procedure of optimization also allows to reduce errors of macromodels. The nonlinear macromodel is constructed in two stages: on the first stage the linear macromodel is introduced and on the next step nonlinear elements are involved. The software based on proposed approach for implementation of macromodel of real linear and nonlinear circuits is presented. The introduced method is valid for identification of linear and nonlinear macromodels in integral implementation.

**Ключові слова**: макромодель, ідентифікація, оптимізація, змінні стану, дискретні моделі, компонента електронного кола, багатополюсник.

Підписано до друку 18.02.97. Формат 60×84 1/16
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 1. Зам. №45. Тираж 100

ВКРД ЛОУС, вул. 700-річчя Львова, 4.