

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВЧЕНА РАДА Д 01.02.17

На правах рукопису

УДК 621.396.6 : 681.3

КАБАК ВЛАДИСЛАВ СЕМЕНОВИЧ

Кабак
МАКРОМОДЕЛЮВАННЯ АНАЛОГОВИХ
ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ
ПРОГРАМОВАНИХ ОПЕРАЦІЙНИХ
ПІДСИЛЮВАЧІВ

05.13.05 - системи автоматизації проектування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття вченого
ступеня кандидата технічних наук

Київ - 1996



00759830 (W)

Дисертація є рукописом.

Робота виконана у Запорізькому державному технічному університеті.

Науковий керівник : кандидат технічних наук,

доцент Рогоза В.С.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Стахів П.Г.

кандидат технічних наук, доцент

Бобін В.В.

Провідна організація:

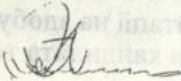
КБ "Електроавтоматика", м. Запоріжжя

Захист відбудеться 20 травня 1996 року о 15 годині на засіданні спеціалізованої Ради Д01.02.17 у Національному технічному університеті України "КПІ" (252056, Київ-56, проспект Перемоги, 37), корп. 12, ауд. 412.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України, "КПІ".

Автореферат розіслано 16 квітня 1996г.

Вчений секретар
спеціалізованої Ради
кандидат технічних наук
професор

 Писаренко Л.Д.

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

Загальна характеристика роботи

Актуальність проблеми. В умовах суттєвого збільшення розмірності задач аналізу радіоелектронної апаратури (РЕА) основною тенденцією у підвищенні ефективності програм моделювання стало комплексне використання схемних та системних підходів, які базуються на ідеях фрагментації та організації окремих обчислювальних процесів, збільшення поняття "елемент" і спрощення його моделі (макромодельовання). Інтерес до макромодельовання пояснюється в значній мірі розвитком компонентної бази електронної техніки на основі інтегральних мікросхем (ІС), що потребує відмови від традиційного подання їх розгорнутими моделями. В зв'язку з цим зростає потреба в забезпеченні сучасних програм аналізу бібліотеками макромоделей (ММ).

Серед основних недоліків при практичному застосуванні ММ в сучасних програмах автоматизації схемотехнічного проектування (АСХП) можна виділити такі:

1. Користувач не може у повному обсязі оцінити вірогідність результатів розрахунку. Невірогідність може викликатися різними причинами: незадовільною ідентифікацією параметрів моделі, виходом робочого режиму елемента за межі області адекватності його моделі, накопиченням алгоритмічних помилок.

2. Моделювання достатньо великих схем і результати розрахунку значно відрізняються від очікуваних, тобто схеми непрацездатні. Причина несподіваних результатів моделювання полягає не в незадовільній роботі схеми, а в позначених вище помилках моделей.

Вказані недоліки треба враховувати і при моделюванні аналогових електронних пристроїв на основі програмованих операційних підсилювачів (ОП).

Програмовані підсилювачі характеризуються тим, що їх експлуатаційні характеристики можна легко змінювати і прилагоджувати до загальних потреб системи. Відомо, що ОП з внутрішньою частотною корекцією зберігають стійкість незалежно від частоти сигналу. Однак, забезпечення стійкості призводить до того, що такі ОП мають обмежену смугу пропуску на малих сигналах, низьку швидкість зростання вихідної напруги та низьку

смуго перепуску на повній потужності. Таким чином, задача вибору способу та параметрів частотної корекції ОП, яка в більшості випадків обумовлює як стійкість, так і різні показники якості роботи аналогових пристроїв на основі програмованих ОП з глибокими зворотними зв'язками, потребує додаткових теоретичних та практичних досліджень.

Конденсатор зовнішньої корекції являє собою одну з форм програмованого підсилювача. Операційні підсилювачі такого типу з гнучким застосуванням отримали назву частотно-програмованих підсилювачів.

Однак, відомі ММ ОП синтезовано у припущенні, що ємність корекції міститься усереднені кристалу. До того ж, при моделюванні розглядаються ОП тільки з внутрішньою корекцією інтегруючого типу.

Такий підхід не дозволяє оптимізувати параметри операційної схеми шляхом зміни форми частотної характеристики відповідно з ступенем послаблення сигналу в ланцюгу зворотнього зв'язку, смугою перепуску, відповідним запасом по фазі, припустимим перерегулюванням і т. і. Але ж швидкість зростання вихідного сигналу, гранична частота при повній потужності, напруга шумів залежать від місця вмикання, типу та величини коректуючих елементів. Задача адекватного моделювання програмованих ОП стає ще більш актуальною, якщо вимоги до скоректованого ОП задаються не у вигляді форми АЧХ, а як ряд глобальних показників якості - час встановлення, викиди, смути перепуску і т. і. Крім того, використання нестандартного увімкнення частотно-програмованих ОП може призвести до суттєвого зменшення запасів стійкості по фазі і амплітуді та, як слідство, до нестійкої роботи операційної схеми, що абсолютно не відображається існуючими макромоделями. Тому, задача підвищення ефективності методів макромоделювання аналогових пристроїв на основі програмованих ОП є актуальною.

Мета та задачі дослідження.

Подана дисертаційна робота належить до галузі досліджень, присвячених підвищенню ефективності методів макромоделювання під час аналізу аналогових електронних пристроїв на основі програмованих ОП.

Метою роботи є теоретичні дослідження та розробка

методики побудови ММ програмованих ОП, підвищення вірогідності та точності розрахунків, розширення класу схем, що аналізуються та проєктуються за допомогою ЕОМ.

З вищесказаного випливають такі задачі:

1. Побудова формалізованої методики макромодельовання ОП як з внутрішніми, так і з зовнішніми ланцюгами корекції.

2. Розробка базової ММ ОП, яка з заданою точністю відображає неідеальність функціонування ОП. Базова модель повинна легко адаптуватися до будь-яких методів корекції.

3. Побудова бібліотеки ММ ОП.

4. Розробка автоматизованої процедури визначення параметрів ММ при будь-якому способі корекції.

5. Відображення у моделі впливу зовнішніх факторів (напруги живлення, температури і т. і.).

6. Забезпечення можливості використання розроблених ММ в різних програмах аналізу електронних схем.

7. Оцінювання у межах використаної програми аналізу стійкості схеми, що аналізується.

Основні методи дослідження.

Для вирішення поставлених задач на базі сучасної теорії електронних схем запропоновано аналіз схемотехніки, основних характеристик, параметрів ОП. Вивчено та узагальнено різні способи корекції, механізм їх дії на параметри ІС.

При виконанні роботи використовувались елементи теорії множин, методи теорії електронних ланцюгів, теорії автоматичного регулювання, методи обчислювальної математики та структурного програмування. Дослідження ефективності запропонованих моделей та алгоритмів здійснювались за допомогою обчислювальних і натурних експериментів.

Наукова новизна.

1. Розроблено формалізовану методику моделювання програмованих ОП;

2. Запропоновано базову ММ ОП, яка відповідає будь-яким можливим способам корекції.

3. Визначено набір експериментальних даних і умови їх вимірювань, необхідний для ідентифікації параметрів частотно-програмованих ОП в частотній та часовій зоні.

4. Запропоновано спосіб моделювання енергоспоживання

ОП, що дозволяє аналізувати схеми з нестандартним ввімкненням ланцюгів живлення.

5. Запропоновано методика оцінювання стійкості схем за допомогою використаної програми аналізу.

6. Розроблено критерії вибору найкращого варіанту з ієрархічного ряду ММ.

Практична цінність роботи. Дисертаційна робота є частиною госпдоговірних і держбюджетних науково-дослідних робіт, виконуваних на кафедрі радіотехніки Запорізького державного технічного університету. Практична цінність роботи полягає у тому, що в результаті виконаних досліджень створено бібліотеку ММ ОП, яка дозволяє суттєво розширити клас схем, що аналізуються за допомогою ЕОМ, підвищити вірогідність і точність моделювання та, як наслідок, скоротити терміни розробки нових виробів.

Методика моделювання та бібліотека ММ ОП, розроблені в дисертаційній роботі, упроваджені в роботу конструкторського бюро "Електроавтоматика", м. Запоріжжя та в Запорізькому науково-дослідному інституті радіозв'язку. Бібліотеку ММ ОП упроваджено в учбовий процес Запорізького державного технічного університету.

А п р о б а ц і я р о б о т и. Основні результати роботи доповідалися та були обговорені на обласній науково-технічній конференції молодих вчених (1984 р., м. Запоріжжя), на республіканській конференції "Моделювання та ідентифікація компонентів і вузлів електронної техніки" (1985 р., м. Київ), республіканській конференції "Методологічні проблеми автоматизованого проектування і дослідження систем" (1987 р., м. Севастополь), республіканській школі-семінарі "Математичне машинне моделювання в мікроелектроніці" (1988 р., м. Паланга), республіканських конференціях "Проблема адаптація алгоритмічного та інформаційного забезпечення САПР" (1989 р., 1990 р., м. Київ), науково-методичній конференції "Комп'ютерні технології в організації навчального процесу в технічному вузі" (1995 р., м. Київ), міжнародній науково-методичній конференції "Новітні технології навчання у вищих та середніх учбових закладах" (1995 р., м. Рівне).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 18 друкованих робіт. Крім того, окремі результати теоретичних та експериментальних досліджень відображено у 6 звітах з науково дослідних робіт, які проводились згідно планів НДР Запорізького державного технічного університету.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація містить основну частину та бібліографію. Основна частина складається з вступу, чотирьох розділів і заключення, викладених на 162 сторінках машинописного тексту, включаючи 74 малюнки. Додаток до дисертації виконаний на 42 сторінках. Бібліографія включає в себе 122 найменування.

Основні тези, винесені на захист

1. Методика та результати моделювання частотно-програмованих ОП.

2. Засоби відображення у ММ впливу різних методів корекції в лінійному та нелінійному режимах роботи.

3. Засоби відображення у ММ енергоспоживання від джерела живлення в статичному та динамічному режимах.

4. Метод аналізу стійкості операційної схеми в межах використаної програми аналізу.

5. Методика побудови автоматизованої процедури визначення параметрів ММ.

Основний зміст роботи.

У ВСТУПІ обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовані мета та шляхи її дослідження.

ПЕРШИЙ РОЗДІЛ містить аналітичний огляд існуючих методів макромоделювання та класифікацію ММ у застосуванні до аналогової мікросхемотехніки. Визначені основні недоліки відомих ММ ОП. Виявлено, що відомі методики макромоделювання зовсім не відображають природу впливу коректуючих ланцюгів, а саме:

1) не враховується зв'язок виводів корекції з реальною схемою, в зв'язку з чим не визначені вузли ММ, до яких можливе приєднання реальних ланцюгів корекції;

2) коефіцієнти підсилення на постійному струмі перерозподілені між каскадами ММ довільно, що спричиняє неможливість застосування в ММ ланцюгів корекції, підключених паралельно

одному або декільком каскадам.

3) не наводиться методика визначення імпедансів виводів корекції, як за характеристиками функціонування, так і за тестовими схемами вимірювання, що робить неможливим адекватне відображення в ММ шунтуючих ланцюгів корекції по цим выводам;

4) застосування різних методів корекції не тільки змінює параметри лінійного режиму роботи (АЧХ, ФЧХ), але й суттєво впливає на показники якості ОП в нелінійному режимі роботи (швидкість зростання вихідної напруги, частота повної потужності);

5) покращення динамічних показників якості роботи ОП може призвести до втрати стійкості операційної схеми, що необхідно мати на увазі при розрахунках на БОМ.

В процесі формування методики моделювання ІС, що моделюється, наведена у вигляді багатополосника, характеристика функціонування якого залежить від багатьох зовнішніх впливів та елементів, приєднаних до виводів ІС. Процес моделювання формально зводиться до синтезу такого багатополосника, значення елементів Y або Z матриці якого з необхідною точністю відображають у або з елементи реальної ІС.

Рішення задачі не зустрічає принципових труднощів, якщо є повна електрична схема з відомими значеннями її елементів. Однак, типовою ситуацією, в якій опиняється розробник ММ ІС, є варіант, коли дані про елементи схеми відсутні. В цьому випадку у або з параметри (первинні параметри) необхідно визначити на основі даних функціонування (другорядних параметрів), поданих в технічних умовах (ТУ) або спеціально вимірених.

В такій постановці процедура синтезу ММ ОП відноситься до класу некоректних задач, оскільки синтез лінійного ланцюга за характеристиками вхід-вихід не має лише одного рішення.

Аналіз методів рішення некоректних задач, показує що для розв'язання нашої задачі найбільш доцільно використати метод регуляризації за А. М. Тихоновим, в основі якого лежить використання апріорних додаткових відомостей про можливе рішення. В цій задачі моделювання пропонується використовувати основні принципи схемотехнічної та структурної реалізації ОП.

Головні тези розробленої методики макромодельовання

зводяться до наступного.

- Визначення основних схемних структур, які можуть враховуватися як типові в аналоговій мікросхемотехніці.

Виявлено, що АІС будуються на елементарних каскадах, або багатокаскадних секціях у вигляді каскадних підсилювачів і диференційних каскадів, які з великим ступенем точності можна розглядати як односпрямовані структури. Причому, в частотно-програмованих ОП зв'язки між каскадами вводяться самим розробником РЕА за допомогою виводів корекції.

- Класифікація можливих методів частотної корекції. Визначення вузлів сполучення коректуючих ланцюгів.

Проведений з цієї метою аналіз схемотехніки ОП виявив, що виводами для корекції АЧХ в більшості випадків є виходи підсилюючих каскадів.

- Формування вимог до ММ частотно-програмованих ОП для адекватного аналізу в частотній та часовій областях.

Пропонується ОП, який моделюється відносно коректуючих виводів, подати у вигляді каскадного з'єднання N-односпрямованих активних RC-ланцюжків, входи і виходи яких в загальному випадку можуть бути коректуючими.

При сформованих умовах передаточна функція одного елементарного каскаду та коефіцієнт зворотнього зв'язку легко передаються через шукані первинні параметри Y-матриці.

$$K_{ji} = \frac{S - Y_{jj}}{Y_{ji} + \sum Y_{jj,x}}, \quad \beta_{ij} = -\frac{Y_{ij}}{Y_{ii} + \sum Y_{ii,x}} \quad (1.1)$$

де Y_{jj} - власна провідність зовнішніх виводів корекції; Y_{jj} - провідність елементів зовнішнього зворотнього зв'язку між входом та виходом каскаду; $\sum Y_{jj,x}$ - провідність зовнішніх елементів, приєднаних між зовнішнім виводом та загальною шиною; S - крутість підсилюючого каскаду (секції).

- Визначення необхідного набору експериментальних даних та умов їх вимірювання. Оскільки в активній смузі частот АЧХ і ФЧХ ОП практично повністю визначаються ланцюгами корекції, то за первинний набір експериментальних характеристик

пропонується використовувати АЧХ і ФЧХ, визначені при різних номіналах коректуючих ланцюгів (в тому числі при відсутності корекції); вибір номіналів коректуючих ланцюгів повинен визначатися мінімальною чутливістю рішення первинної системи до варіації другорядних параметрів.

- Складання системи рівнянь для другорядних параметрів функціонування (модуль і фаза передаточної функції) по запропонованій моделі. Система рівнянь складається на основі відомих співвідношень між первинними та другорядними параметрами при поданні каскадів моделі відповідно (1.1).

- Вибір характерних частот, для яких проводиться аналіз та рішення сформованої системи рівнянь. Через те, що ОП використовується, як правило, в операційних схемах з глибокими зворотними зв'язками, поведіння АЧХ і ФЧХ в області частоти одиничного підсилення визначає запаси стійкості з фази і амплітуди. Тому пропонується формувати систему комплексних рівнянь для частоти одиничного підсилення ω_c та відповідного фазового зсуву φ_c .

ДРУГИЙ РОЗДІЛ присвячений конкретному використанню запропонованої методики при моделюванні ОП як з зовнішніми, так і з внутрішніми ланцюгами корекції.

Перед усім наведена класифікація методів частотної корекції. Доведено, що для адекватного моделювання динамічних характеристик ОП з зовнішніми ланцюгами частотної компенсації треба мати реальні значення коефіцієнтів передачі від входів ОП до виводів корекції, а також власних імпедансів виводів корекції. Розроблено способи відображення в ММ дії різних коректуючих ланцюгів. Для вирішення цієї задачі сформульовано основні тези, які відображають структурну та схемотехнічну реалізацію ОП:

- ОП без корекції АЧХ не має нулів в активній смузі частот (тобто від нуля до ω_T , тому прохідний ланцюг моделі можна подати у вигляді каскадного з'єднання RC-ланцюжків, які відображають відповідні полюси АЧХ без корекції, та керованих джерел струму.

- Кількість полюсів АЧХ ОП без корекції не перевищує трьох без урахування полюса навантаження.

Це припущення обумовлено тим, що існуючі вітчизняні та закордонні ОП інтегрального виконання складаються по двох -

або трьохкаскадній схемі, а полюси АЧХ, визначені допоміжними каскадами типу повторювача напруги і т. і, розташовані, як правило, за межами робочої смуги частот.

- Полюси операційної схеми, обумовлені вхідним та вихідним імпедансами ОП, розташовані вище частоти одиничного посилення.

- Максимальне число виводів ОП для приєднання зовнішніх елементів корекції, не перевищує трьох, причому виводами для корекції безпосередньо є виходи підсилюючих каскадів. Остання умова виконується для переважної більшості ОП другого покоління.

- Максимально можлива швидкість зростання сигналу у будь-якій точці схеми обмежена максимальним струмом перезаряду ємності корекції, який спроможна віддати попередня частина схеми. Таким чином, відображення динамічної нелінійності досягається введенням обмеження рівнів керованих джерел струму.

- Для тих РС-ланцюжків ММ, з яких немає виводу для приєднання зовнішніх елементів корекції, достатньо задати постійну часу $\tau_i = R_i C_i$, яка визначає відповідний полюс каскаду без корекції. В протилежному випадку R і C повинні наближатися до реальних значень.

У відповідності з методикою, викладеною в першому розділі, утворено системи рівнянь відносно первинних параметрів для основних методів корекції, рекомендованих ТУ. Розв'язання сформованих систем дозволило отримати розрахункові формули для первинних параметрів моделі.

Для корекції з приєднанням ємності в ланцюг зворотнього зв'язку між i-м та (i+1)-м каскадами (корекція інтегруючого типу), отримано співвідношення, які з урахуванням відомих з ТУ значень полюсів АЧХ скоректованого ОП дозволили з достатньою точністю ідентифікувати такі параметри моделі: K_{oi} , K_{oi+1} - коефіцієнти передачі i-го та (i+1)-го каскаду з постійного струму; власні імпеданси виводів.

$$K_{oi} = - \left(\frac{\omega_{i+1} C_{i+1}}{\omega_{pi} C_{kop}} \right) \frac{1 + \sin \varphi_i}{\cos \varphi_i} ,$$

$$K_{0,i+1} \approx \frac{\omega_r \tau_{i+1} (1 + C_i / C_{кор})}{\left(\frac{1 + \sin \psi_1}{\cos \psi_1} \right) \left(\frac{C_i}{C_{кор}} - 1 \right)}$$

$$R_i = \frac{1}{\omega_{p1} K_{0,i+1} C_{кор}}$$

$$R_{i+1} \approx \frac{1 + \sin \psi_1}{\omega_{p1} C_{кор} \cos \psi_1}, \quad K_0 = K_{0i} \cdot K_{0,i+1}$$

$$\tau_i = 1/\omega_i = R_i C_i, \quad \tau_{i+1} = 1/\omega_{i+1} = R_{i+1} C_{i+1}$$

де K_0 - коефіцієнт підсилення ОП на постійному струмі;
 ω_{p1}, ω_i - полюси АЧХ ОП з корекцією та без корекції відповідно;
 ψ_1 - фазовий зсув на частоті одиничного підсилення.

Доведено, що мінімальна помилка при визначенні первинних параметрів буде досягнена, якщо за початкові експериментальні характеристики ОП з корекцією використовувати ФЧХ і АЧХ, що відповідають оптимальній корекції (фазовий набіг на частоті повинен складати (-135°)).

Аналогічні розрахункові співвідношення отримані і для корекції шунтуючого типу. Оскільки саме ці два способи корекції обов'язково присутні в ТУ на ІС, то отриманого набору розрахункових формул достатньо для ідентифікації моделі в частотній області.

Визначення рівней обмеження і максимальних значень керованих джерел струму здійснюється за характеристиками повної потужності та значенню швидкості зростання вихідної напруги. Розроблено методику розрахунку параметрів ММ, які визначають динамічні нелінійності ОП. Порівняння значень

первинних параметрів, отриманих з аналізу ОП в лінійному та нелінійному режимах роботи, дозволяє оцінити обумовленість ММ та підвищити її точність.

У ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛІ подане математичне обґрунтування моделі ОП, наведеної у вигляді повного багатополосника. На цій основі розроблено базову ММ ОП з відображенням властивого цієї ІС методу корекції. Еквівалентна схема ММ вміщує модель входу, прохідну модель та модель вихідного каскаду.

В моделі входу, на відміну від загальноприйнятого варіанту завдання вхідних струмів через середнє значення вхідних струмів $I_{\text{вх}}$ та їх різницю $\Delta I_{\text{вх}}$ введені доповнення, що дозволяють відображати відмінність вхідного опору з постійного і змінного струмів, та інші параметри практично без ускладнення моделі.

В розробленій прохідній моделі, що відображає підсилюючі, частотні і нелінійні якості ОП, значення елементів визначаються по методиці, наведеній в 1-ому і 2-ому розділах. Використання диференційного ланцюга у базовій ММ зумовлено наявністю в ряді ОП (140 УД9, 140 УД11 та ін.) зовнішніх виводів корекції з обох плеч каскаду. Напрямок джерел струму вибирається з умови зберігання необхідної полярності сигналу на всіх зовнішніх виводах у відповідності з принциповою та структурною схемою ОП.

Для оцінювання теплових режимів роботи ОП і завадостійкості по ланцюгах живлення запропоновані два способи моделювання енергоспоживання. Так у простих функціональних моделях з наданого в 4-ому розділі ієрархічного ряду ММ, енергоспоживання пропонується відображати двома джерелами струму по відповідних виводах живлення. Розробник ММ або користувач можуть використати цей варіант моделювання енергоспоживання в тому разі, якщо є можливість введення в ММ вузла з нульовим потенціалом. В більшості ОП такий вузол відсутній і можуть виникати труднощі в приєднанні вузла ММ з нульовим потенціалом до досліджуваної схеми. Тому в базовій ММ реалізовано більш універсальний спосіб моделювання енергоспоживання, який, окрім усунення вищезазначеного недоліку, дозволяє також аналізувати схеми із зворотними зв'язками по виводах джерел живлення. З цією метою модель виходу реалізована комбінацією методів спрощення та функціональної подібності, причому точка з нульовим потенціалом утворюється

автоматично при симетрії живлення.

Складений таким чином вихідний ланцюг моделі еквівалентний двотактному емітерному повторювачу. Модель автоматично відображає параметри при зміні живлення, у тому числі і при асиметрії джерела.

Значення всіх елементів ММ і параметри їх функціональних залежностей визначаються тільки на основі даних технічних умов (ТУ). Показано зв'язок параметрів ММ з основними нормованими параметрами та характеристиками, наданими в ТУ.

Таким чином, розроблена в цій роботі базова ММ ОП є більш універсальною в області застосування, ніж відомі раніше. Запропонована ММ придатна до будь-якого використаного в ОП способу корекції, точніше відображає споживання струму від джерела струму в статичі і динаміці. Це дозволило суттєво розширити клас схем, що аналізуються на ЕОМ, а також підвищити вірогідність розрахунків.

На основі базової ММ створено бібліотеку ММ ОП 140, 153, 157, 544, 551, 744 серій. Зміни та відмінності моделей конкретних ОП торкались лише кількості ланцюжків прохідного ланцюга, а також введення елементів корекції, конструктивно розташованих в корпусі мікросхеми.

В ЧЕТВЕРТОМУ РОЗДІЛІ наведено результати моделювання на ЕОМ як тестових схем, наданих у ТУ, так і ряду функціональних вузлів. Всі ММ з запропонованої бібліотеки протестовано в схемах виміру параметрів ІС згідно ТУ. Відхилення отриманих при аналізі на ЕОМ результатів від наданих у ТУ не перевищує 10%. Перевірка адекватності ММ проводилась за допомогою програм аналізу МАЕС - 2, NAP - 2, PSPICE, МАЕС - П.

Показано ефективність застосування запропонованої ММ для аналізу практичних схем з нестандартним приєднанням коректуючих ланцюгів. Помилка розрахунків в частотній зоні склала 5-10%, в часовій зоні не більше 15%, що підтверджують наведені в цьому розділі результати натурного та обчислювального експериментів.

З метою підвищення ефективності методів макромодельовання розроблено автоматичну процедуру визначення параметрів ММ на підставі даних ТУ. Запропоновано формули перерахунку

параметрів ОП і, відповідно, ММ для довільних значень напруг живлення і температури.

Оскільки застосування форсованої корекції може призводити до зменшення запасів стійкості досліджуваної схеми, то запропоновано методику аналізу стійкості операційної схеми в межах використаної програми моделювання.

Сутність методу полягає у визначенні петлевого підсилення з оцінюванням запасів стійкості по фазі та амплітуді при збереженні лінійного режиму роботи ІС. З цією метою в розрив ланцюга зворотнього зв'язку приєднується тестовий Е, R, С ланцюг, який моделює режим повторювача для напруги постійного струму та короткого замикання для змінної складової частини струму. Визначено вузли приєднання тестового ланцюга і джерела вхідного сигналу для аналізу комплексного коефіцієнта передачі по петлі. Ефективність методу продемонстрована при дослідженні ряду практичних схем, для яких проводились як обчислювальні, так і натурні експерименти.

Розроблено ієрархічний ряд макромоделей. Наведено критерії вибору переважного варіанту, сформовані на підставі аналізу динамічної помилки виконання математичної операції операційною схемою.

В ДОДАТКУ 1 наведена бібліотека ММ ОП 140, 153, 157, 544, 744 серій на мові програм аналізу МАЕС-2.

В ДОДАТКУ 2 міститься пакет програм, формуючих автоматизовану процедуру визначення параметрів ММ при конкретних значеннях напруги живлення і температури.

В ДОДАТКУ 3 наведені документи про впровадження результатів дисертаційної роботи в народне господарство.

ВИСНОВКИ. Основні результати дисертаційної роботи полягають у нижченаведеному:

1. Запропоновано методику макромодельовання операційних підсилювачів з відображенням властивого поданій ІС методу корекції. Методика базується на використанні даних, наведених в технічних умовах на відповідні ІС. Ніяких додаткових вимірювань параметрів мікросхем, як правило, не вимагається, що забезпечує оперативне створення ММ користувачем.

2. Сформовано вимоги до ММ частотно-програмованих ОП,

які дозволяють адекватно моделювати операційну схему в часовій та частотній областях.

3. Визначено набір експериментальних характеристик, наведених в ТУ, необхідний для моделювання частотно-програмованих ОП. Виявлено, що вибір другорядних параметрів функціонування і умови їх виміру повинні визначатися мінімальною чутливістю рішення початкової системи рівнянь до варіації другорядних параметрів.

4. Розроблено базову ММ ОП, яка з заданою точністю відображає неідеальність функціонування ІС в усіх основних режимах, передбачених ТУ. На основі базової ММ наведено бібліотеку макромоделей ОП.

5. Запропонована ММ дозволяє відображати не тільки основні параметри та режими роботи реальних ІС, обумовлених в ТУ, але й водночас враховувати зміни температури і напруги живлення за допомогою автоматизованої процедури формування ММ.

6. Запропоновано метод аналізу стійкості операційних схем в межах використаної програми моделювання.

7. Наведено рекомендації по використанню ієрархічного ряду ММ ОП.

8. Методику формування макромоделей доведено до інженерного використання.

По матеріалах дисертації опубліковано такі роботи:

1. Герасименко В.П., Кабак В.С. Вихідний ланцюг макромоделей операційного підсилювача //Радіотехніка. - Харків, Вища шк., 1985 - Вип. 75 - С.133-138.

2. Герасименко В.П., Кабак В.С. Макромодельовання операційних підсилювачів МДМ - типу. // Радіоелектроніка. - 1985. - №9. - С.41-45 (Вісті вищ. учб. закладів).

3. Герасименко В.Ф., Кабак В.С. Прохідний ланцюг макромоделей операційного підсилювача. //Радіоелектроніка. - 1986. - №6 - С.76-79 (Вісті вищ. учб. закладів).

4. Герасименко В.П., Кабак В.С. Макромодельовання динамічних нелінійностей операційних підсилювачів. //Радіоелектроніка. 1988. - №3. - С.43-46. (Вісті вищ. учб. закладів).

5. Герасименко В.П., Кабак В.С. Формалізація процесу макромоделювання аналогових інтегральних схем.

//Радіоелектроніка. - 1990. - №6. - С.50-55 (Вісті вищ. учб. закладів).

6. Герасименко В.П., Кабак В.С. Базова макромодель операційних підсилювачів. // Радіотехніка. - 1990. - №6. - С.92-93 (Вісті вищ. учб. закладів).

7. Лізунов С.І., Кабак В.С. Макромодельовання перетворювачів форми зображення інформації. //Електронне моделювання. - 1992. - №1.-С.46-48.

8. А.С. N 953596 СРСР М.Кл G01 R27/28 Пристрій автоматичного контролю амплітудно-частотних характеристик /Герасименко В.П., Кабак В.С., Ізварін Ю.В., Солдатов Б.Т. - N 3241153/18-21; Заяв. 03.02.81; Опубл. 23.08.82. Бюл. N 31.

9. Кабак В.С. Макромодельовання частотно-програмованих операційних підсилювачів. //Тези доповідей обласної науково-технічної конференції "Молоді вчені та фахівці області - реалізації регіональних цільових комплексних програм, прискоренню науково-технічного прогресу". - Запоріжжя, 1984.- С.81.

10. Кабак В.С. Макромодель операційного підсилювача з зовнішніми ланцюгами частотної корекції. //Тези доповідей другої обласної конференції молодих вчених. - Запоріжжя, 1986, - С.76.

11. Кабак В.С. Статистичне оцінювання параметрів операційних підсилювачів по даних технічних умов. //Тези доповідей третьої обласної науково-технічної конференції. - Запоріжжя. 1988. - С.85.

12. Кабак В.С. Моделювання аналогових електронних пристроїв з застосуванням макромоделей.//Тези доповідей міжнародної науково-методичної конференції "Новітні технології навчання у вищих та середніх учбових закладах". - Рівне. - 1995.- С.34.

13. Кабак В.С. Навчально-контролюючий комплекс з курсу "Аналогові електронні пристрої". // Тези доповідей науково-методичної конференції "Комп'ютерні технології в організації та проведенні навчального процесу в технічному вузі". - Київ. - 1995. - С. 30.

14. Кабак В.С. Автоматизований блок формування макромоделей операційних підсилювачів. - Інформаційний листок.- Запоріжжя. Комунар. 1991.

15. Функціональні моделі інтегральних схем. /Герасименко

В.П., Изварін Ю.В., Кабак В.С., Лізунов С.І., Ушмасва Л.В. - Інформаційний листок.- Запоріжжя, Комунар.1982.

16. Кабак В.С., Фесечко С.Н. Автоматизоване визначання параметрів макромоделі операційного підсилювача. //Тези доповідей другої обласної конференції молодих вчених. - Запоріжжя. 1986. - С.83.

17. Герасименко В.П., Кабак В.С. Бібліотека макромоделей ОП. //Тези доповідей республіканської конференції "Методологічні проблеми автоматизованого проектування і дослідження систем." - Севастополь. 1987. - С. 111

18. Кабак В.С., Бандурко В.М. Ймовірнісний розрахунок функціональних вузлів на операційних посилювачах в статичному режимі. //Тези доповідей третьої обласної науково-технічної конференції. - Запоріжжя. 1988. - С.80.

ABSTRACT

Vladyslav Kabak

"Macromodeling of the analog electronic devices based on programmable operational amplifiers", manuscript 05.13.05 "CAD systems".

The national technical University of Ukraine" Kiev politechnical institute", Kiev, 1996.

The main principles and results are:

- methods of operational amplifiers macromodeling with reflection the method of frequency compensation which is peculiar to that integrated circuit;

- experimental characteristics set required for modeling of frequency-programmable operational amplifiers;

- the basic macromodel of operational amplifiers, which reflects the processing non-ideality of IC for all main modes foreseen by the technical conditions;

- the operational amplifiers macromodels library;

- autoform macromodel's procedure for different values of direct source voltage and temperature;

- methods of the operational scheme stability analyses in the modeling programme being used.

ЛНБ ім. В. Стефанива
АН України

