

КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

ЛУНТОВСЬКИЙ Андрій Олегович

УДК 681.3

**ВЕРІФІКАЦІЯ ПРИНЦИПОВИХ
ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СХЕМ
ЦИФРОВОЇ АПАРАТУРИ**

**Спеціальність 05.13.12 — Системи автоматизації
проектування**

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

КИЇВ — 1993

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00810648 (R)

КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

ЛУНТОВСЬКИЙ Андрій Олегович

А.Лунт

УДК 681.3

Верифікація принципів та функціональних схем
цифрової апаратури

Спеціальність 05.13.12 - Системи автоматизації проектування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

КИЇВ - 1993

Роботу виконано на кафедрі САПР Київського політехнічного інституту.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент,
КИСЕЛЬОВ Г.Д.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент АН України
ЄВДОКИМОВ В.Ф.

кандидат технічних наук, доцент
ЧЕБАНЕНКО Т.М.

Ведуча організація: КНДІРВА

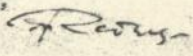
Захист відбудеться "15" 11 1993р. о 15 год 00 хв. в ауд. 412,
корп.12 на засіданні спеціалізованої Ради КО68.14.17 при Київському
політехнічному інституті за адресою: 252056, м. Київ-56, пр. Перемоги,
37, корпус 12.

Відгук на автореферат у двох примірниках, які завіряються печаткою,
просимо надсилати за вказаною адресою на ім'я вченого секретаря
спеціалізованої Ради.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці інституту.

Автореферат розісланий "12" 10 1993р.

Вчений секретар спеціалізованої Ради,
кандидат технічних наук, доцент



КОЩЕВ Ю.Д.

1. АНОТАЦІЯ.

1.1. Мета роботи.

МЕТОЮ дисертаційної роботи є розробка функціонально повної методології комплексної верифікації принципових та функціональних схем цифрової апаратури.

1.2. Задачі, що вирішуються.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішуються такі ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ:

1. Визначення складу та постановка функціональних задач верифікації цифрових схем, що їх виконано на базі інтегральних мікросхем та функціональних вузлів.

2. Розробка математичних моделей цифрових схем та їх елементів, необхідних для вирішення поставлених функціональних задач верифікації.

3. Розробка методик та алгоритмів вирішення поставлених функціональних задач верифікації цифрових схем.

4. Розробка архітектури спеціалізованого банку даних для вирішення поставлених функціональних задач верифікації цифрових схем.

5. Розробка архітектури програмно-методичного комплексу верифікації цифрових схем та програмна реалізація його компонент на персональній ЕОМ.

1.3. Положення, що захищаються.

Вирішували поставлені у дисертаційній роботі задачі, автор захищає такі ПОЛОЖЕННЯ:

1. Функціонально повну інженерну методику, що забезпечує комплексну верифікацію цифрових схем, що їх виконано на базі цифрових інтегральних мікросхем та окремих функціональних вузлів.

2. Реалізація спеціалізованого банку даних, що підтримує комплексні математичні моделі цифрових схем та їх елементів у складі системи автоматизації функціонально-логічного проектування.

3. Методику формування комплексної математичної моделі цифрової інтегральної мікросхеми та функціонального вузла цифрової схеми.

4. Методику структурного аналізу цифрової схеми.

5. Методику статистичного аналізу цифрової схеми.

2. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ.

2.1. Актуальність роботи.

Оснoву автоматизації функціонально-логічного проектування (ФЛП) на сучасному етапі складає верифікація синтезованих чи створених традиційними ручними засобами проектних рішень. Як об'єкт проектування у пропонованій дисертаційній роботі розглянуто цифрову схему (ЦС), що її

виконано на базі цифрових інтегральних мікросхем (ІМС) та окремих функціональних вузлів (ФВ). Під верифікацією принципів та функціональних схем цифрової апаратури (ЦА) маємо на увазі вирішення у режимах спостереження таких 8 функціональних задач перевірки якості функціонування схем, або функціональних задач верифікації (ФВЗ):

- 1) Формування комплексної математичної моделі цифрової інтегральної мікросхеми та функціонального вузла ЦС.
- 2) Перевірка виконання електричних правил побудови ЦС.
- 3) Розрахунок струмового навантаження у вузлах ЦС та припусків на угоджуючі опори у дротових з'єднаннях (ДЗ).
- 4) Розрахунок ємкісного навантаження у вузлах ЦС.
- 5) Розрахунок номінальних значень затримок розповсюдження (ЗР) у вузлах ЦС.
- 6) Розрахунок статистичних характеристик (СтХ) ЦС за методом Монте-Карло.
- 7) Розрахунок статистичних характеристик ЦС за методом найгіршого випадку.
- 8) Розрахунок параметрів факторної макромоделі ЦС.

Підвищення вимог до якості ЦА зумовлює необхідність проведення комплексної верифікації ЦС, що іх виконано на базі цифрових ІМС та окремих ФВ. Комплексний підхід до верифікації передбачає одночасний розвиток методів вирішення ФВЗ та їх інформаційного забезпечення, що його організовано у вигляді спеціалізованого банку даних (СБнД). Цю дисертаційну роботу присвячено дослідженням в обох указаних напрямках. У роботі запропоновано методичку та маршрут проектування (МПр), що забезпечують комплексне вирішення ФВЗ та об'єднують у єдиному інформаційному середовищі, або СБнД, процедури формування математичної моделі (ММ) елемента (ММЕ) та математичної моделі схеми (ММС), структурної, логіко-часової та статистичної верифікації ЦС.

Деякі з вказаних вище ФВЗ із успіхом вирішуються у таких системах автоматизації ФЛП на персональних ЕОМ типу ІВМ РС, як P-CAD, FLY Digital Design, LCA-1, SUSIE, ЛВМ-3, SYMPLER, TEGAS, rSPICE, САМОВАР, МОДАСС-ПК та ПРАМ-ПК. Однак вирішення задач формування комплексної ММЕ ЦС, розрахунку номінальних значень ЗР у вузлах ЦС, розрахунку статистичних характеристик ЦС за методами Монте-Карло та найгіршого випадку, розрахунку параметрів факторної макромоделі (ФММ) ЦС у названих системах не виконується. Вирішення решти ФВЗ має такі головні відмінності та недоліки:

- використано інші концептуальні моделі (постановки);

- за деякими із запропонованих критеріїв оцінку якості ЦС раніше не проводили;

- верифікація ЦС виконується на відмінному рівні або окремому підрівні ієрархії представлення властивостей ЦС;

- не застосовується комплексний підхід до верифікації ЦС;

- не використовується комплексна дискретна математична модель цифрової ІМС та функціонального вузла ЦС;

- не забезпечується необхідний рівень адекватності аналізу часових порушень у ЦС.

Сформулюймо головні вимоги до комплексної методики верифікації ЦС.

1. Одним із головних "вузьких" місць у САПР є номенклатура ММЕ, що використовуються. Для вирішення поставлених ФЗВ необхідно розробити орієнтовані на непрофесійного програміста засоби автоматизованого проектування ММЕ, що реалізують комплексний маршрут проектування та дозволяють створювати економічні швидкодіючі компілятивні дискретні ММ, які враховують електричні та динамічні параметри реальних елементів, можливий випадковий розкид значень динамічних параметрів (статистичні параметри), а також вплив зовнішніх факторів (ЗФ) на параметри елементів.

2. У сучасній САПР функціонально-логічного рівня повинні застосовуватися алгоритми структурного аналізу (СА) ЦС, що відрізняються ширшим набором функцій та комплексністю, враховують особливості функціонування у часі ДЗ, дозволяють розраховувати електричні параметри вузлів за електричними параметрами використаних ІМС та різноманітні моделі ЗР логічних сигналів (ЛС), а також врахувати вплив ЗФ на значення ЗР.

3. Адекватність логіко-часової верифікації ЦС суттєво залежить від кількості та виду знайдених часових порушень. Практичний та науковий інтерес складає дослідження впливу випадкового розкиду ЗР на виникнення змагання та появу на епохах часових діаграм інтервалів невизначеності (ІН) для елементів, які розташовані на критичних путях розповсюдження ЛС.

4. СБНД повинен відповідати головним вимогам до даних у САПР та забезпечувати вирішення задач формування ММЕ, структурного й статистичного аналізу ЦС у пропонованих постановках.

Таким чином, розробка комплексних математичних моделей цифрових інтегральних мікросхем та окремих функціональних вузлів та спеціалізованого банку даних, що забезпечують вирішення поставлених ФЗВ; розробка методик та алгоритмів структурного й статистичного аналізу принци-

пових та функціональних схем цифрової апаратури; програмна реалізація розроблених алгоритмів та інформаційних структур на персональній ЕОМ складають АКТУАЛЬНУ науково-технічну задачу.

2.2. Методи дослідження.

Для вирішення поставлених задач автор використовує математичний апарат теорій множин, графів, кінцевих автоматів, сітей Петрі, баз даних (БД) та штучного інтелекту (ШІ), чисельних методів, теорії ймовірностей, математичної статистики (МС) та планування експерименту (ПЕ).

2.3. Наукова новизна.

Запропоновано комплексну інженерну методологію верифікації цифрових схем, що їх виконано на базі цифрових інтегральних мікросхем та окремих функціональних вузлів. У межах вказаної методології розроблено:

1. Методику формування комплексної математичної моделі цифрової інтегральної мікросхеми та функціонального вузла цифрової схеми, що годиться для вирішення поставлених функціональних задач верифікації. Вказана модель використовує чотиризначну логіку, є компілятивною дискретною математичною моделлю другого рівня складності та відрізняється від існуючих у САПР функціонально-логічного рівня тим, що враховує типові параметри та характерні залежності між ними: електричні та динамічні параметри реальних елементів, можливий випадковий розкид значень динамічних параметрів (статистичні параметри), а також вплив на параметри елементів зовнішніх факторів.

2. Методику структурного аналізу цифрової схеми на запропонованій математичній моделі елементу. Відрізняючими рисами вказаної методики є комплексність, можливість автоматичних перетворень математичної моделі схеми, що дозволяють враховувати особливості функціонування у часі дровових з'єднань. Методика дозволяє розраховувати електричні параметри вузлів та затримки розповсюдження логічних сигналів за електричними параметрами використаних ІМС, враховувати вплив зовнішніх факторів на значення затримок, що підвищує точність подійного моделювання з використанням чотиризначного алфавіту.

3. Методику статистичного аналізу на запропонованій математичній моделі елементу, що виконує розрахунок статистичних характеристик та параметрів факторної мікромоделі цифрової схеми, які враховують вплив випадкового розкиду значень затримок розповсюдження та зовнішніх факторів на величини інтервалів невизначеності часових діаграм на виходах елементів, розташованих на критичних путях розповсюдження логічних

сигналів. Методика відрізняється від існуючих тим, що а) досліджується часові координати амагань логічних сигналів; б) аналізується найбільш вірогідний, але не найгірший випадок у відношенні внутрішніх параметрів; в) адекватність аналізу забезпечується використанням лише чотиризначного, але не багатозначного алфавіту представлення логічних сигналів.

2.4. Практична цінність та впровадження результатів роботи.

Запропоновані у дисертаційній роботі методики апробовано у складі програмно-методичного комплексу (ПМК) функціонально-логічного проектування цифрової електронної апаратури КОМОЛ-ПК. Застосування ПМК дозволяє:

а) створювати економічні з точки зору витрат оперативної та зовнішньої пам'яті ЕОМ, швидкодіючі компілятивні дискретні математичні моделі другого рівня складності, що враховують електричні та динамічні параметри реальних елементів, можливий випадковий розкид значень динамічних параметрів (статистичні параметри), а також вплив на параметри елементів зовнішніх факторів;

б) суттєво скоротити терміни проектування математичних моделей елементів цифрових схем, залучити до їх розробки користувачів системи автоматизації функціонально-логічного проектування, які не є професійними програмістами, забезпечити зручність супроводу спеціалізованої бази даних;

в) розраховувати електричні режими та затримки розповсюдження логічних сигналів за електричними параметрами використаних цифрових ІМС, враховувати особливості функціонування у часі дрових з'єднань, для подійного засобу організації обчислень адекватно моделювати розповсюдження логічних сигналів крізь монтажну логіку та двоспрямовані шини;

г) виконувати подійне моделювання з використанням різноманітних моделей затримок розповсюдження (модель, що розраховується за емкісним навантаженням; мінімальну, максимальну та номінальну моделі; модель призначених затримок), а також стохастичні моделі затримок (модель, що розраховується за емкісним навантаженням та апроксимує емпіричні розподіли; модель, що враховує емпіричні розподіли; модель, що враховує емпіричні розподіли під впливом на них зовнішніх факторів), враховувати вплив зовнішніх факторів на значення затримок розповсюдження;

д) досліджувати залежність розподілу вихідних параметрів схеми від емпіричних або апроксимованих розподілів затримок, побудовою вибіркового статистик цього розподілу та аналізом номінальних значень, глибини

взаємного впливу, гістограм розподілу, ймовірності роботопридатності для обраного проектного рішення;

е) досліджувати залежність розподілу вихідних параметрів схеми від зовнішніх факторів, які визначають емпіричні розподіли затримок, розраховувати за методом прирощень чуттєвість вихідних параметрів до зміни зовнішніх та прогнозувати значення вихідних параметрів найгіршого випадку;

ж) розраховувати параметри адекватної лінійної факторної макромоделі схеми, що відбиває залежність вихідних параметрів від зовнішніх факторів, які визначають емпіричні розподіли затримок, та потім прогнозувати поведінку схеми у заданій точці факторного простору.

Результати роботи використано під час виконання переліку науково-дослідних держбюджетних та госпдоговірних робіт кафедри САПР КПІ у 1989-1993рр. та впроваджено у таких установах: ЦКБ КІО "Завод АРСЕНАЛ", м.Київ; КНДІ радіовиміральної апаратури, м.Київ, СКТБ "КАРАТ", м.Вингород.

2.5. Апробація роботи.

Головні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на республіканських школах-семінарах "Методи автоматизованого проектування ЗВА і СБИС (САПР СБИС-89,90)", м.Чернівці, 1989, 1990рр.; науково-технічних конференціях "Графические диалоговые системы в проектировании, управлении обучения", м.Київ, 1990, 1991рр.; семінарі "Информатика в технологии приборостроения", м.Ленінград, 1990р.; Всесоюзній школі-семінарі молодих вчених "Машинная графика и автоматизация проектирования в радиоэлектронике", м.Челябінськ, 1990р.; республіканській науково-технічній конференції "Проблемы автоматизации контроля электронных устройств", м.Винниця, 1990р.; республіканських школах-семінарах "Опыт разработки и применения приборно-технологических САПР", смт.Славськ, 1991, 1992рр.; республіканській школі-семінарі "Системы автоматизации проектирования РЗА и СБИС (САПР РЗА-91)", м.Київ, 1991р.; республіканській науково-технічній конференції "Проблемы автоматизации контроля и диагностирования сложных технических систем", м.Житомир, 1991р.; республіканській науково-технічній конференції "Проблемы автоматизации проектирования в электронике", м.Київ, 1992р.; республіканській науково-технічній конференції "Проблемы автоматизированного моделирования в электронике", м.Київ, 1993р.

2.6. Публікації.

Матеріали дисертаційної роботи відбито у 25 друкованих працях (9

статей у журналах, 16 тезисів доповідей на науково-технічних конференціях та школах-семінарах).

2.7. Структура та розмір роботи.

Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох глав, висновку, переліку літератури та трьох додатків, її викладено на 263 машинописних сторінках, ілюстровано 42 малюнками та 5 таблицями.

3. ГОЛОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

У роботі запропоновано класифікацію сучасних методів верифікації ЦС на ІМС та ФБ, визначено місце методів формування ММЕ, що реалізують підходи синтезу та аналізу одночасно, обґрунтовано вибір функціонально-топологічного мультиграфу, що його запропоновано у роботах Кисельова Г.Д., як формалізованої структури ММС. Інформаційне забезпечення вирішення ФЗВ організується у вигляді СБнД. Головними вимогами до СБнД є надійність зберігання інформації, гнучка організація та відкритість структури, логічна структуризація даних, ефективність доступу до даних та керування їх достовірністю. Досліджено інформаційний та лінгвістичний аспекти організації СБнД. Зовнішня модель даних (ЗМД) є семантична модель "СУТНОСТЕЙ-АТРИБУТИВ-ЗВ'ЯЗКІВ". Концептуальна модель даних (КМД) є модель структур даних, у термінах реляційного підходу КМД є сукупність таблиць. Перехід від КМД до внутрішньої моделі даних (ВнМД) виконано шляхом інтерпретації понять "відношення", "кортеж", "атрибут" у термінах алгоритмічної мови програмування (АМП). Запропоновано моделі проектно-незалежної та проектно-залежної БД (ПНБД та ПЗБД відповідно), що займають проміжне положення між ЗМД та КМД, визначають логічну структуру даних та перетворення над ними та дають можливість логічно непротивного опису ієрархічних інформаційних зв'язків у бібліотеках ММЕ (БМ) та у проектах ЦС, а також опису у термінах запропонованих моделей абстрактних структур даних (АСД), специфікацій файлів, процедур та МПР. На основі запропонованих АСД вирішено задачу відображення та реалізовано структури зберігання (СЗ), що задовольняють таким вимогам: зручність адресації, простота включення, виключення, обходу, порівняння, конкатенації елементів та швидкий доступ до атомарних елементів. Одержані СЗ відповідають вимогам функціональної повноти, несуперечності та цілісності. Необхідна для формування ММС інформація зберігається у БМ у вигляді сукупностей описів умовно-графічних зображень, структур, алгоритмів функціонування, таблиць типових значень електричних параметрів (ЕП), таблиць детермінованих функціональних залежностей та гістограм розподілу динамічних параметрів (ДП) з врахуванням впливу зовнішньої середовища, або статистичних

параметрів (СтП). Запропонованим СЗ відповідають спеціалізовані мови проектування, що забезпечують ефективність та простоту підготовки даних та інформаційну сумісність ПМК з комерційними САПР. Показано придатність класичних АСД під час організації СВнД, який забезпечує вирішення ФЗВ принципівих та функціональних схем ЦА, що їх виконано на ІМС та ФВ.

Розглянемо постановку задачі формування ММЕ. Комплексну ММЕ представлено у вигляді $f: S \rightarrow \Gamma, \Gamma = \{0, 1, X, 3\}$,
 $y = f(\bar{x}, \bar{y}, t, \overline{EP_{6x}}, \overline{EP_{6yx}}, \overline{DP}, \overline{CT_{12}}, \overline{CT_{12}}, \overline{CT_{13}}, \overline{3\Phi})$, (1)
 де f - дискретна вектор-функція, яку визначено на дискретно-безперервному просторі S , t - модельний час, \bar{x} , \bar{y} та \bar{y} - вектори вхідних, вихідних та внутрішніх дискретних змінних, $\overline{EP_{6x}}$ та $\overline{EP_{6yx}}$ - вектори вхідних та вихідних електричних параметрів, \overline{DP} - вектор динамічних параметрів виходів та двунправлених виводів, $\overline{CT_{12}}$ та $\overline{CT_{13}}$ - вектори статистичних параметрів виходів та двоспрямованих виводів, $\overline{3\Phi}$ - вектор значень зовнішніх факторів та їхніх припусків. Використовується табличний спосіб завдання параметрів на мові параметричного опису (МПО) та еквівалентний табличному спосіб завдання поведінки за допомогою програми, на мові функціонального опису (МФО). Задача формування ММЕ формується як задача структурного синтезу (СтрС) функціонального опису та опису параметрів з наступною верифікацією. У роботі обґрунтовано вибір АМП ПАСКАЛЬ як МФО, зумовлений виравністю його засобів, що не поступаються засобам відомих мов логічного моделювання ЦА, орієнтацією на масового користувача та необхідністю забезпечення єдиного мовного інтерфейсу ПМК. Задача СтрС функціонального опису (ФО) формується як задача побудови коректної програми на ЯЕО та вирішується на базі декларативних та процедурних знань про програму на МФО як об'єкт синтезу. Алгоритм СтрС реалізує елементи підходів трансформації описів, перебору закінчених структур (ЗС) та нарощування структури. Базовими елементами є коментарі, об'яви та оператори. Макроеlementи - це типові для цифрової ІМС певного типу, наприклад, шифратора, сукупності речень та операторів на МФО, яких оформлено у вигляді об'яв, визначень та викликів з фактичними параметрами підпрограм (функцій або процедур). ЗС - це сукупність речень, операторів та викликів з фактичними параметрами підпрограм, що складають підпрограму-процедуру. Отримання ЗС, що не потребують подальшого нарощування, можливе лише для невеликого класу алгоритмічно простих ММЕ. Для опису узагальненої структури програми використовується семантична сітка у вигляді І-АБО-дерева. Процедурна частина знань про об'єкт синтезу

представлено у вигляді системи продукцій. Верифікація ФО здійснюється за допомогою засобів синтаксичного та семантичного контролю. Для синтаксичного контролю ФО використовується транслятор з МГО, для семантичного - процедури логічного та динамічного тестування. Формування опису параметрів ММЕ здійснюється заповненням відповідних таблиць з використанням МГО.

Запропонований комплексний алгоритм формування ММЕ дозволяє створювати економічні з точки зору витрат оперативної та зовнішньої пам'яті, швидкодіючі компілятивні дискретні ММ другого рівня складності, тобто такі, що враховують електричні та динамічні параметри реальних елементів, можливий випадковий розкид значень динамічних параметрів (статистичні параметри), а також вплив ЗФ на параметри елементів, зовнішніх факторів. Алгоритм базується на застосуванні елементів ШІ, дозволяє скоротити термін проектування ММЕ цифрових схем, залучити до їх розробки користувачів САПР, що не є професійними програмістами, забезпечити зручність супроводу ПНЕД. Це й визначає його переваги у зрівнянні з відомими алгоритмами (системи LCA-1, FLY Digital Design, CAMOBAP та інші).

Розглянемо постановку задачі СА ЦС. Задача СА ЦС формується у вигляді:

$$Y_j < TB_j, j = 1, N_{осм}, \quad (2)$$

де Y_j та TB_j - j -й параметр ЦС, що контролюється, та його верхнє значення, $N_{осм}$ - кількість параметрів, що контролюються. Запропоновано алгоритм СА, що виконує перевірку обмежень на розміри ЦС; перевірку виконання електричних правил побудови ЦС; розв'язку ДЗ; розрахунок струмового навантаження у вузлах та припусків на узгоджуючі опори у ДЗ; розрахунок ємнісного навантаження у вузлах ЦС; розрахунок номінальних значень ЗР. Алгоритм СА ЦС використовує такі детерміновані моделі ЗР: модель ЗР, що розраховується за ємнісним навантаженням; мінімальна, максимальна та номінальна моделі ЗР; модель призначених ЗР.

Особливостями алгоритму є використання широкого набору функцій та комплексність у застосуванні відомих методів СА. Запропонований алгоритм дозволяє враховувати особливості функціонування у часі ДЗ, розраховувати електричні параметри вузлів за електричними параметрами використаних ІМС та різноманітні моделі ЗР в ЦС, враховувати вплив ЗФ на значення ЗР, що визначає його відмінності від от аналогічних алгоритмів (система ДНЕПР-2).

Розглянемо постановку задачі статистичного аналізу (СТА) ЦС. ЦС описується у просторі зовнішніх, внутрішніх та вихідних параметрів (ЗП, ВВП та ВилП):

$F_{\text{цс}}(\vec{Z}(\vec{Q}), \vec{T}) = 0, \vec{T} \in D, Q_{\text{рmin}} \leq Q_p \leq Q_{\text{рmax}}, p = \overline{1, p}, (3)$
 $Z_j^{\text{min}} \leq Z_j \leq Z_j^{\text{max}}, j = \overline{1, m}, D: T_i^{\text{min}} \leq T_i \leq T_i^{\text{max}}, i = \overline{1, n},$
 де \vec{Q}, \vec{Z} та \vec{T} - вектори ЗП, ВнП та ВихП, D - область роботоздатності (ОР) схеми. Як ЗП прийнято температуру зовнішньої середи, напругу джерел живлення, потужність дози випромінювання тощо, як ВнП - затримки розповсюдження J у вузлах ЦС, як ВихП використовуються величини ІН на критичних шляхах розповсюдження ЛС.

Під СтХ будемо розуміти отримані та досліджувані у процесі СТА статистики ВихП. Запропоновано алгоритми СТА ЦС, що виконують розрахунок СтХ за методом Монте-Карло, що враховує вплив випадкового розкиду ЗР на величини ІН часових діаграм на виходах елементів, розташованих на критичних шляхах розповсюдження ЛС; б) розрахунок СтХ за методом найгіршого випадку (НВ), що враховує вплив випадкового розкиду значень ЗП на величини ІН часових діаграм на виходах елементів, розташованих на критичних шляхах розповсюдження ЛС; в) розрахунок параметрів СММ, що враховує вплив випадкового розкиду значень ЗП на величини ІН часових діаграм на виходах елементів, розташованих на критичних шляхах розповсюдження ЛС, за методом планування експерименту. Алгоритм СТА використовує такі стохастичні моделі ЗР: модель ЗР, що розраховується за емпіричним навантаженням та апроксимує емпіричні розподіли; модель ЗР, що враховує емпіричні розподіли; модель ЗР, що враховує емпіричні розподіли під впливом на них ЗФ.

Розглянемо алгоритм розрахунку СтХ ЦС за методом Монте-Карло. Моделювання емпіричних розподілів ЗР виконується за такою схемою: за допомогою стандартного датчику рівномірного розподілу ЕОМ видуває псевдовипадкове число (ПВЧ); перетворює його до ПВЧ, яке розподілене за гаусовським законом; за двома сусідніми гаусовськими квантилями на основі таблиць СтП визначаються межі відповідного класового інтервалу; за інтерполяційною формулою розраховується значення ЗР, що розподілене за емпіричним законом. Особливості: а) ЗР у вузлах ЦС статистично незалежні, що спрощує спосіб їх моделювання; б) передбачено можливість застосування гаусовської апроксимації емпіричних розподілів ЗР (як головні моменти гаусовських розподілів використовуються значення, які розраховуються за допомогою алгоритма СА). Розрахунок ймовірності роботоздатності (ЙР) для ОР виконується, якщо є можливість апроксимація розподілів ВихП розподілом Гауса. Для розрахунку ЙР $P((4a))$ у залежності від розміру задачі та необхідної точності використовуються квадратурні формули прямого методу Монте-Карло (для $n > 8, (4b)$), Гауса (для $2 < n \leq 8, (4b)$) та Сімпсона (для $n = 2$); формула таблицьно-лінійної інтерполяції з використанням таблиці інтегралів ймовірностей (для $n = 1$); форму-

ла LU-факторизації (під час обернення кореляційної матриці (КМ) та обчислення її детермінанта, для $n \geq 2$):

$$\rho = P(\overline{T} \in D) = \int_D h(\overline{\sigma}) d\overline{\sigma}, \quad 1, \text{ якщо } \overline{T} \in D, \quad (4a)$$

$$\rho = (1/N) \sum_{\ell=1}^N h(\overline{T}_\ell) \delta \ell, \quad \delta \ell = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \overline{T}_\ell \in D, \\ 0, & \text{якщо } \overline{T}_\ell \notin D, \end{cases} \quad (4б)$$

$$\rho = C \sum_{\psi_1=1}^4 \dots \sum_{\psi_{n-1}=1}^4 Q_{\psi_i} \exp(S_{\psi_i, \psi_i}),$$

$$C = (1/2\pi)^{n/2} \cdot \sqrt{|1/Det|} \prod_{i=1}^n (T_{i \max} - T_{i \min}) / 2S_i, \quad (4в)$$

$$Q_{\psi_i} = \prod_{t=1}^n A_{t\psi_i}, \quad R = \|R_{tr}\|, \quad (i, r, t) = \overline{1, n},$$

$$S_{\psi_i, \psi_i} = \sum_{t=1}^n \sum_{r=1}^n R'_{tr} X_{t\psi_i} X_{r\psi_i},$$

$$X_{t\psi_i} = (T_{i \max} + T_{i \min} - 2M_i) / 2S_i + N_{i\psi_i} (T_{i \max} - T_{i \min}) / 2S_i,$$

де \overline{T}_ℓ - значення вектору ВихП для ℓ -го варіанту аналізу, $A_{i\psi_i}$ та $N_{i\psi_i}$ - вага формули та значення ψ_i -го вузла i -ї складової вектору ВихП, M та S - вектори математичних очікувань та середньоквадратичних відхилень ВихП, Det - детермінант КМ ВихП, R' - обернена КМ, N - загальна кількість варіантів аналізу (КВА).

Розглянемо алгоритм розрахунку СтХ ЦС за методом НВ. Значення ЗП визначаються за номером комбінації кодованого рівня ЗФ (КРЗФ) для 3-рівневого кодування ЗФ. Значення ЗР обчислюються за таблицями СтП для кожного КРЗФ за аналогічною описаній вище схемою. Абсолютні коефіцієнти чуттєвості (КЧут) a_{ip} i -го ВихП до зміни p -го ЗП обчислюються за методом прирощень:

$$a_{ip} = (T^{+ip} - T^{-ip}) / (Q_p^+ - Q_p^-), \quad i = \overline{1, n}, p = \overline{1, 9}, \quad (5)$$

де Q_p^+ та Q_p^- - значення складових вектору ЗП на межах припусків, T^{+ip} та T^{-ip} - значення i -го ВихП для значень Q_p^+ та Q_p^- . На базі КЧут розраховуються вектори $\overline{T}_{нв}^+$ та $\overline{T}_{нв}^-$ ВихП найгіршого випадку при двобічних обмеженнях для ОР. КВА дорівнює $2q + 2n$.

Розглянемо алгоритм розрахунку параметрів ФММ ЦС за методом планування експерименту. Значення ЗП визначаються за номером комбінації КРЗФ для 2-рівневого кодування ЗФ. Значення ЗР обчислюються за таблицями СтП для кожного КРЗФ за аналогічною схемою. Як ФММ ЦС застосовано множину лінійну регресію:

$$T_i = \sum_{s=0}^q B_{is} Q_s^* = B^*_{i0} + \sum_{s=1}^q B^*_{is} Q_s, \quad i = \overline{1, n} \quad (6)$$

де B_{is} та B^*_{is} - коефіцієнти регресії для i -го ВихП для ЗП, що їх представлено у нормованій та натуральній (іменованій) формах, Q_s^* - безрозмірні ЗП, яких представлено КРЗФ. Особливості: а) перевірка гіпотези про придатність для ВихП гаусовського розподілу здійснюється на етапі розрахунку СтХ за методом Монте-Карло (якщо гаусовський розподіл є непридатним, то й побудова ФММ є неможливою); б) у зв'язку з невеликим розміром задачі ($q \leq 7$), використовується повний факторний план типу $C = 2^q$, а не дробові та не композиційні плани, оскільки використання композиційних планів доцільно лише поблизу області оптимуму досліджуваних функцій відгуку та є ускладненим через труднощі підбору та визначення СтП у так званих "зоряних" точках. КВА W визначається як

$$W = \sum_{\ell=1}^C m_{\ell}, \quad (7)$$

де m_{ℓ} - кількість паралельних дослідів у ℓ -му варіанті аналізу.

Постановка задачі Ста ЦС у дисертаційній роботі відрізняється від запропонованих у працях Шмида А.В., Левіна В.І. та інших, оскільки а) досліджується часові координати змагань ЛС у ЦС на ІМС и ФВ; б) аналізується не найгірший випадок у відношенні ВнП (моделювання з невизначеністю, що наростає), а на базі емпіричних або апроксимованих розподілів ВнП - найбільш вірогідний випадок; в) адекватність аналізу забезпечується використанням лише чотиризначного, але не багатозначного алфавіту представлення ЛС; г) застосовується різноманітні моделі ЗР. Алгоритми Ста базуються на застосуванні методів МС та ПЕ, реалізують числові схеми, які є схожими з тими, що використано у працях Белякова Ю.Н., Курмаєва Ф.А. та Баталова Б.В. (НДІАвтоматика, Москва, система САМРІС-3), Годлевського В.С. та Левітського В.Г. (ІПМЕ АН України), Барабашука В.І. та Креденцера В.П. Запропоновані алгоритми Ста є орієнтованими на комплексне використання та дозволяють, на відміну від відомих (наприклад, алгоритму моделювання з невизначеністю, що наростає, у системі FLY Digital Design), а) досліджувати залежність розподілу ВихП від емпіричних або апроксимованих розподілів ЗР побудовою вибірових статистик цього розподілу та аналізом номінальних значень, глибини взаємного впливу, гістограм розподілу, ЯР для обраного проектного рішення; б) досліджувати залежність розподілу ВихП від ЗФ, які визначають емпіричні розподіли затримок, розраховувати за чуттєвість

Вихід до зміни зовнішніх та прогнозувати значення Вихід найгіршого випадку; в) будувати адекватну лінійну ФММ, що відбиває залежність Вихід від ЗФ, які визначають емпіричні розподіли затримок, та потім прогнозувати поведінку схеми у заданій точці факторного простору.

У роботі запропоновано інженерну методику, що забезпечує проведення комплексної верифікації ЦС та дозволяє залучити кінцевого користувача до проєктування складних ММЕ, підвищити рівні бездефектності та автоматизації ФШП.

4. ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ.

Визначено склад та виконано постановку функціональних задач верифікації цифрових схем, що їх виконано на базі інтегральних мікросхем та функціональних вузлів.

1. Запропоновано комплексну математичну модель цифрової інтегральної мікросхеми та функціонального вузла цифрової схеми, що годиться для вирішення поставлених функціональних задач верифікації. Вказана модель використовує чотиризначну логіку, є компілятивною дискретною математичною моделлю другого рівня складності та відрізняється від існуючих у САПР функціонально-логічного рівня тим, що враховує типові параметри та характерні залежності між ними: електричні та динамічні параметри реальних елементів, можливий випадковий розкид значень динамічних параметрів (статистичні параметри), а також вплив на параметри елементів зовнішніх факторів.

2. Розроблено методику структурного аналізу цифрової схеми на запропонованій математичній моделі елементу. Відрізняючими рисами вказаної методики є комплексність, можливість автоматичних перетворень математичної моделі схеми, що дозволяють враховувати особливості функціонування у часі дрових з'єднань. Методика дозволяє розраховувати електричні параметри вузлів та затримки розповсюдження логічних сигналів за електричними параметрами використаних інтегральних мікросхем, враховувати вплив зовнішніх факторів на значення затримок, що підвищує точність подійного моделювання з використанням чотиризначного алфавіту.

3. Розроблено методику статистичного аналізу на запропонованій математичній моделі елементу, що виконує розрахунок статистичних характеристик та параметрів факторної макромоделі цифрової схеми, які враховують вплив випадкового розкиду значень затримок розповсюдження та зовнішніх факторів на величини інтервалів невизначеності часових діаграм на виходах елементів, розташованих на критичних путях розповсюдження логічних сигналів. Методика відрізняється від існуючих тим, що

а) досліджується часові координати змагань логічних сигналів; б) аналізується найбільш вірогідний, але не найгірший випадок у відношенні внутрішніх параметрів; в) адекватність аналізу забезпечується використанням лише чотиризначного, але не багатозначного алфавиту представлення логічних сигналів.

4. Запропоновано структури зберігання математичних моделей цифрових схем та їх елементів, придатні для вирішення поставлених функціональних задач верифікації. Виконано програмну реалізацію запропонованих структур зберігання у базі даних системи автоматизації функціонально-логічного проектування. Спроектовано бібліотеки математичних моделей цифрових інтегральних схем (серії 155, 531, 533, 555, 556, 561 та 564), сумісні за форматами даних з комерційними САПР OrCAD та P-CAD.

5. Розроблені математичні моделі, методики та алгоритми реалізовано на персональній ЕОМ у складі системи автоматизації функціонально-логічного проектування.

5. ГОЛОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА МАТЕРІАЛАМИ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ.

1. Кубушкайтес А.И., Лунтовский А.О. ППП структурного проектирования аналого-цифровых схем МОДАСС-ПК для персональных ЭВМ //Методы автоматизированного проектирования ЭВА и СБИС (САПР СБИС-88): Тез. докл. школы-семинара. - Черновцы, 1989. - С.9-10.

2. Лунтовский А.О. Диалоговый пользовательский интерфейс системы МОДАСС-ПК //Системы автоматизированного проектирования СБИС (САПР СБИС-90): Тез. докл. школы-семинара. - Черновцы, 1990. - С.11-12.

3. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О. Проектирование диалогового пользовательского интерфейса системы функционально-логического проектирования КОМОЛ-ПК //Графические диалоговые системы в проектировании, управлении обучения: Тез. докл. научно-технической конф. - Киев, 1990. - С.25-26.

4. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О. Система проектирования цифровых схем на ПЭВМ. Структура и принципы проектирования //Информатика в технологии приборостроения: Тез. докл. семинара. - Ленинград, 1990. - С.133-134.

5. Гиоргизова-Гай В.Ш., Гальперина Е.Б., Лунтовский А.О. Логическое моделирование и анализ цифровых схем на ПЭВМ //Информатика в технологии приборостроения: Тез. докл. семинара. - Ленинград, 1990. - С.135-136.

6. Киселев Г.Д., Гиоргизова-Гай В.Ш., Гальперина Е.Б., Лунтовский А.О. Временная верификация результатов логического моделирования цифровых схем в системе функционально-логического проектирования КОМОЛ-ПК //Ма-

- шинная графика и автоматизация проектирования в радиоэлектронике: Тез. докл. Всесоюзной школы-семинара молодых ученых. - Челябинск, 1990. - С.111-112.
7. Киселев Г.Д., Гиоргизова-Гай В.Ш., Лунтовский А.О., Гальперина Е.Б. Моделирование цифровых схем в ИСАПР ЦА на ПЭВМ //Проблемы автоматизации контроля электронных устройств: Тез. докл. респ. научно-технической конф. - Винница, 1990. - С.28-30.
8. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О. Организация специализированного банка данных САПР БИС КОМОЛ-ПК //Опыт разработки и применения приборно-технологических САПР: Тез. докл. школы-семинара. - Львов, 1991. - С.104-105.
9. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О., Гиоргизова-Гай В.Ш., Гальперина Е.Б., Зубрий Л.Г. Диалоговая система функционально-логического проектирования цифровых схем КОМОЛ-ПК //Системы автоматизации проектирования РЭА и СБИС (САПР РЭА-91: Тез. докл. школы-семинара. - Киев, 1991. - С.8-11.
10. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О. Программно-информационное обеспечение интерактивной системы функционально-логического проектирования цифровых схем //Графические диалоговые системы в проектировании, управлении обучения: Тез. докл. научно-технической конф. - Киев, 1991. - С.22-25.
11. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О. Верификация проектов цифровых схем на ПЭВМ с использованием статистических методов //Идентификация, измерение характеристик и имитация случайных сигналов: Тез. докл. Всесоюзной научно-технической конф. - Новосибирск, 1991. - С.123-124.
12. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О. Статистический анализ проектов в САПР цифровых схем //Проблемы автоматизации проектирования в электронике: Тез. докл. конф. - Киев, 1992. - С.20-21.
13. Киселев Г.Д., Гиоргизова-Гай В.Ш., Лунтовский А.О., Гальперина Е.Б. Верификация проектов в САПР ЦС КОМОЛ-ПК //Автоматизация проектирования РЭА и СБИС (САПР СБИС-1992): Тез. докл. школы-семинара. - Славско, 1992. - С.32-33.
14. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О., Гиоргизова-Гай В.Ш., Гальперина Е.Б., Зубрий Л.Г. САПР цифровых схем на ПЭВМ КОМОЛ-ПК //Автоматизация проектирования РЭА и СБИС (САПР СБИС-1992): Тез. докл. школы-семинара. - Славско, 1992. - С.30-31.
15. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О., Гиоргизова-Гай В.Ш. САПР математических моделей серийных цифровых микросхем //Автоматизация проектирования РЭА и СБИС (САПР СБИС-1992): Тез. докл. школы-семинара. - Славско,

ко, 1992. - С.31-32.

16. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О., Гиоргизова-Гай В.Ш., Гальперина Е.Б., Зубрий Л.Г. САПР цифровых схем на ПЗЕМ КОМОЛ-ПК //Проблемы автоматизации контроля и диагностирования сложных технических систем: Тез. докл. респ. научно-технической конф. - Житомир, 1991. - С.85-86.

17. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О. Инструментальные программные средства системы функционально-логического проектирования //Вестн. Киев. политех. ин-та. Радиоэлектроника. - 1991. - Вып.28. - С.19-20.

18. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О., Гиоргизова-Гай В.Ш. Подсистема автоматизации проектирования библиотек моделей в составе САПР цифровых схем //Вестн. Киев. политех. ин-та. Радиоэлектроника. - 1992. - Вып.29. - С.3-14.

19. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О., Гиоргизова-Гай В.Ш., Гальперина Е.Б. Логическое моделирование цифровых БИС на персональных ЭЕМ //Автоматизация проектирования в электрон.: Респ. межвед. научно-техн. сб. - К.: Техника. - 1991. - Вып.44. - С.117-123.

20. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О. Организация информационного обеспечения системы проектирования цифровых схем на ПЗЕМ //Автоматизация проектирования в электрон.: Респ. межвед. научно-техн. сб. - К.: Техника. - 1991. - Вып.45. - С.47-56.

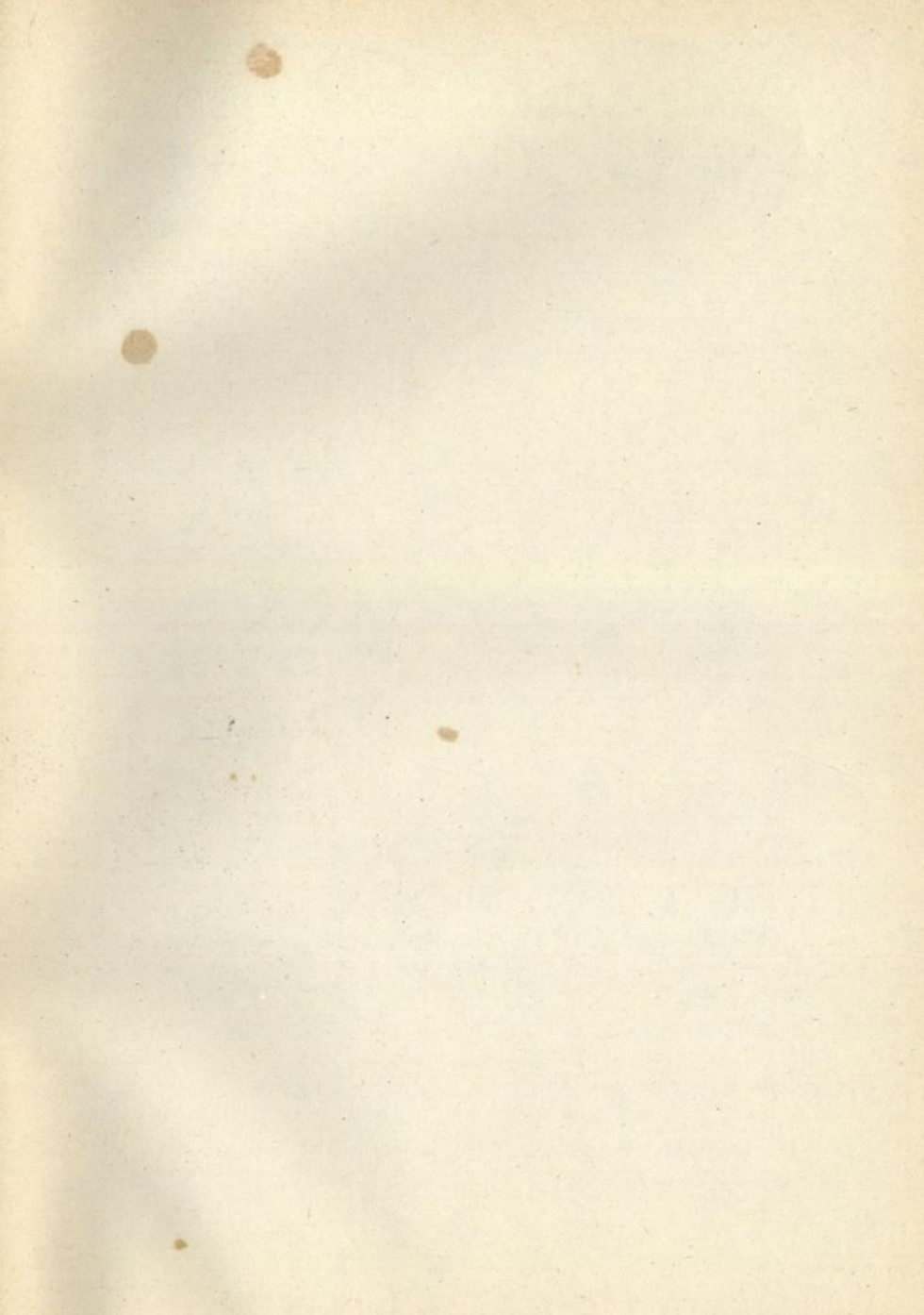
21. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О. Вероятностный логико-динамический анализ цифровых схем в САПР //Автоматизация проектирования в электрон.: Респ. межвед. научно-техн. сб. - К.: Техника. - 1991. - Вып.46: - С.28-35.

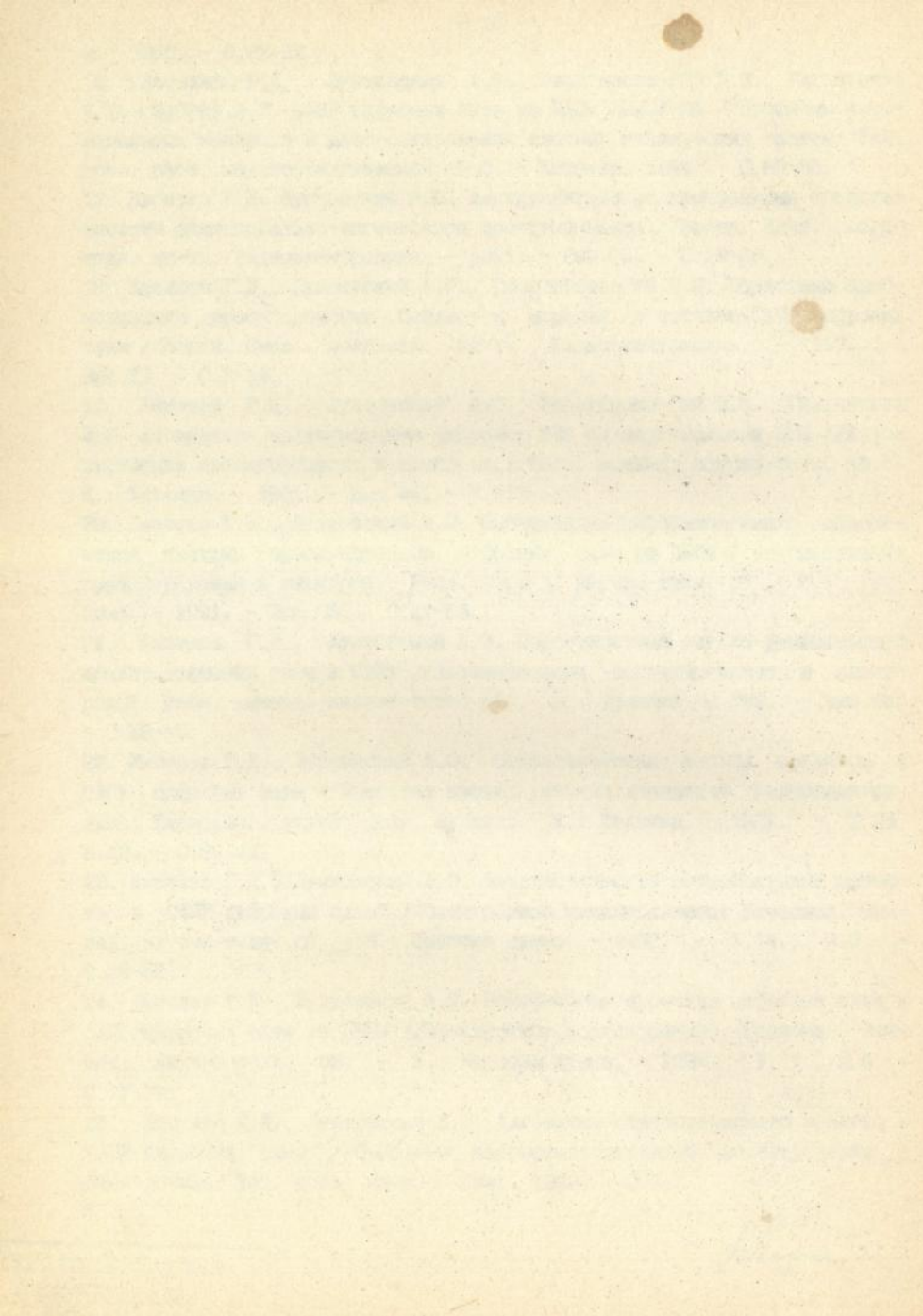
22. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О. Статистический анализ проектов в САПР цифровых схем //Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника: Ежемесячн. научно-техн. журнал. - К.: Техника. - 1992. - Т.35, N.12. - С.34-44.

23. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О. Лингвистическое сопровождение проекта в САПР цифровых схем" //Электронное моделирование: Всесоюз. межвед. научно-техн. сб. - К.: Наукова думка. - 1992. - Т.14., N.5. - С.48-52.

24. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О. Верификация проектов цифровых схем в САПР цифровых схем на ПЗЕМ //Электронное моделирование: Всесоюз. межвед. научно-техн. сб. - К.: Наукова думка. - 1992. - Т.14., N.6. - С.71-77.

25. Киселев Г.Д., Лунтовский А.О. Алгоритмы статистического анализа в САПР цифровых схем //Проблемы автоматизированного моделирования в электронике: Тез. докл. конф. - Киев, 1993. - С.7.





715 28.233
АВ 28.233