

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ „ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”**

МІНЗІОК Вадим Володимирович



УДК 62-507

**РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ АЛГОРИТМІВ
МІНІМІЗАЦІЇ БУЛОВИХ ФУНКЦІЙ У ДОВІЛЬНОМУ ЛОГІКОВОМУ
БАЗИСІ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ЦИФРОВИХ КОМБІНАЦІЙНИХ
ПРИСТРОЇВ**

05.12.13 – Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

ЛЬВІВ – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
РИЦАР Богдан Євгенович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри радіоелектронних пристроїв та систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
КОЗЛОВСЬКИЙ Валерій Валерійович
Національний авіаційний університет,
завідувач кафедри засобів захисту інформації факультету
кібербезпеки та програмної інженерії;

доктор технічних наук, професор
САЙКО Володимир Григорович
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації
імені Героїв Крут,
професор кафедри телекомунікаційних систем та мереж.

Захист відбудеться «14» червня 2024 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 2, аудиторія 218.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий «13» травня 2024 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 35.052.10
доктор технічних наук, доцент



М. І. Бешлей

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Невпинний розвиток технологій сприяє появі нових великих інтегральних схем щораз вищого ступеня інтеграції. Як їх розроблення так і застосування в сфері проектування радіоелектронних цифрових комбінаційних пристроїв призводить до зростання розмірності розв'язуваних завдань. Через це одним з найскладніших стає етап функційно-логічного проектування, теоретичним підґрунтям якого є математичний апарат мінімізації булових функцій.

Ціль мінімізації – одержати такий аналітичний запис булової функції, що має найменший коефіцієнт складності. Коефіцієнт складності логікового виразу – це кількість термів плюс сума рангів всіх термів. При переході до схемотехнічного проектування кожен терм реалізується логіковим елементом, кількість входів якого дорівнює рангу терма. Отже, чим менший аналітичний запис булової функції тим менше потрібно мікросхем та зв'язків між ними чи/і місця на кристалі для її апаратної реалізації.

Із середини ХХ століття почалося активне застосування булової алгебри для проектування пристроїв керування та комп'ютерів. Тоді ж з'явилися перші наукові праці з мінімізації булових функцій.

У подальшому мініатюризація електронних компонентів дала змогу будувати складніші цифрові пристрої. Це призвело до такого зростання складності завдань мінімізації, що точні методи не могли дати результат за прийнятний час обчислень. Тому в 70-80-х роках ХХ століття з'явилася велика кількість евристичних методів мінімізації.

З появою мікросхем складність задач мінімізації булових функцій невинно зростає разом із розвитком інтегральних технологій. З іншого боку зростають можливості обчислювальної техніки. Зокрема, прослідковується тенденція до збільшення кількості ядер та обчислювальних потоків при розробці нових процесорів. Для комп'ютерних обчислень важливі витрати обчислювальних ресурсів (обсяг пам'яті та машинний час, витрачений на обчислення). Можна зменшити витрати машинного часу за рахунок розпаралелювання обчислювальних процесів, але це переважно призводить до зростання витрат пам'яті. І навпаки, можливо зменшити витрати пам'яті за рахунок послідовного виконання обчислень в одному потоці. Комп'ютерна пам'ять та й взагалі апаратне забезпечення обчислень проти програмного забезпечення вже не є таким дороговартісним ресурсом як колись. Натепер вартість програмного забезпечення може в сто і більше разів перевищувати вартість апаратного забезпечення комп'ютера. Тому способи побудови алгоритмів комп'ютерних обчислень розвиваються в бік швидкого розпаралелювання процесів. І навіть якщо закінчується вільна пам'ять, незалежні задачі можна поставити в чергу. Таким чином можна комбінувати розпаралелювання процесів і постановку в чергу залежно від наявності вільної пам'яті. Поза тим здебільшого методи мінімізації розроблено з позицій зручності сприйняття людиною в символічному поданні. У той час як процесор оперує числами і двійковими операціями. Це призводить до ускладнення алгоритмів

комп'ютерної реалізації, що тягне за собою додаткові обчислювальні витрати. Все це викликає потребу нових підходів до розв'язання задач мінімізації булових функцій. Тому не згасає інтерес вчених до цієї проблеми.

На даний час при проектуванні цифрових комбінаційних схем радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій актуальним **науково-практичним завданням** є удосконалення та розроблення алгоритмів та методів мінімізації булових функцій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано в рамках таких держбюджетних тем Національного університету “Львівська політехніка”: НДР ДБ/ВЕРБАЛЬ “Розробка макромоделей відмовостійких радіоелектронних засобів” (№ держреєстрації 0104U002291) Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки та НДР ДБ\Шум “Алгоритми екстракції даних методами ієрархічної кластеризації для важко вирішуваних комбінаторних задач великої розмірності” (№ держреєстрації 0108U000326) Інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій. У цих науково-дослідних роботах автор розробив числове зображення кон'юнктивних термів (кон'юнктермів) булових функцій, удосконалив метод мінімізації булових функцій розчепленням кон'юнктермів, удосконалив метод побітового вирощування простих кон'юнктермів булових функцій, розробив модифікацію методу побітового сортування цілих чисел для мінімізації логікових функцій, розробив метод мінімізації булових функцій побітовим розбиттям зі склеюванням.

Мета і завдання дослідження. *Метою* дисертаційного дослідження є удосконалення відомих та розроблення нових методів логікового синтезу комбінаційних схем, які дають змогу підвищити ефективність проектування цифрових пристроїв.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі основні *завдання*:

- 1) проаналізувати сучасні методи мінімізації булових функцій для виявлення таких, що можуть бути удосконалені;
- 2) удосконалити сучасний точний метод пошуку простих кон'юнктермів булової функції з метою розширення кола розв'язуваних задач;
- 3) удосконалити сучасний евристичний метод пошуку простих кон'юнктермів булової функції з метою розширення кола розв'язуваних задач;
- 4) удосконалити сучасний метод покриття таблиці простих кон'юнктермів булової функції;
- 5) на базі відомих методів сортування чисел розробити модифікацію, оптимізовану для задач мінімізації булових функцій;
- 6) розробити метод мінімізації булових функцій з меншою складністю реалізації порівняно з відомими методами, у тому числі за рахунок унеможливлення появи тавтології в процесі мінімізації.

Об'єкт дослідження – логіковий синтез цифрових комбінаційних пристроїв.

Предмет дослідження – методи мінімізації булових функцій логікового синтезу комбінаційних схем, що визначають ефективність процесу проектування цифрових радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети було використано: теорію цифрових автоматів, математичну логіку, булову алгебру, теорію множин і комбінаторику для побудови теоретичних основ запропонованих методів мінімізації булових функцій для різних форм задання.

Наукова новизна одержаних результатів:

1) вперше запропоновано метод мінімізації булових функцій побітовим розбиттям множини кон'юнктернів на основі розробленої модифікації побітового сортування зі склеюванням, що на відміну від існуючих дає змогу виявляти прості кон'юнктерни низького рангу без проміжних склеювань простим підрахунком кількості кон'юнктернів. Для пошуку тупикових диз'юнктивних нормальних форм запропоновано процедуру ланцюгового покриття множини простих кон'юнктернів, що дає змогу розбивати задачу покриття на декілька обчислювальних потоків;

2) удосконалено метод порозрядного вирощування простих кон'юнктернів. Для цього використано розроблене маскове зображення замість псевдотрійкового, що дало змогу оперувати числовим поданням кон'юнктернів в підмножинах з однаковою маскою, введено поняття коду помітки множини кон'юнктернів для усічення трійкового дерева вирощування простих кон'юнктернів, розроблено процедуру виявлення підмножин, елементи яких склеюються в один кон'юнктерн простим підрахунком кількості елементів одразу на етапі сортування по заданому біту, розширено область застосування методу на недоозначені функції;

3) удосконалено метод побітового сортування множини цілих чисел, що позбавлена тавтології, шляхом підрахунку елементів підмножини в процесі сортування по заданому біту з номером n , що дає змогу виявити склеювання одержаної підмножини в кон'юнктерн і замінити процедуру сортування по решті бітів простим перерахунком від 0 до 2^n-1 . Крім того, оскільки певні методи мінімізації потребують попереднього сортування множини вихідних кон'юнктернів, запропонована модифікація дає змогу одержати частину імплікантів вже на етапі сортування;

4) набув подальшого розвитку метод мінімаксного покриття в теоретико-множинній формі, а саме запропоновано упорядковувати символні диз'юнктерни за наростанням їх потужностей, тобто починаючи з мінімальної. Це пришвидшує процедуру спрощення сформованої множини за рахунок скорочення шляху пошуку спрощуваних диз'юнктернів.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані в дисертаційній роботі наукові результати утворюють теоретичну базу для розроблення алгоритмів і програмних засобів логікового синтезу цифрових комбінаційних схем та на їх основі реалізації процедур комп'ютерного проектування та розроблення цифрових радіотехнічних пристроїв і засобів телекомунікацій, у тому числі на базі програмованих логікових інтегральних схем. Практична цінність отриманих результатів така:

1) за допомогою розробленого в дисертаційній роботі методу мінімізації побітовим розбиттям множини кон'юнктернів розв'язано практичне завдання проектування цифрової комбінаційної схеми на базі програмованої логікової інтегральної схеми для керування мережею радіохвильових сенсорів. У Львівському центрі ІКД НАН та ДКА України було виготовлено прототип

спроєктованої цифрової комбінаційної схеми і виконано його експериментальне дослідження, яке підтвердило стовідсоткову точність реалізації заданих логікових функцій, що підтверджено відповідним актом. Розроблений в дисертаційній роботі удосконалений метод розчеплення кон'юнктернів для мінімізації булових функцій використано ТЗОВ «Міта-Техніка» для проектування універсального сигнального перетворювача промислової автоматики на основі мережі первинних перетворювачів із оцифрованими вихідними сигналами. Порівняно з іншими методами мінімізації вдалося зменшити на 5% кількість комірок ПЛІС, які необхідні для реалізації заданих булових функцій, що дало змогу використати вивільнені ресурси для реалізації інших функцій, зокрема функції самоконтролю, що підтверджено відповідним актом;

2) результати дисертаційної роботи використано для виконання держбюджетних науково-дослідних робіт ДБ/ВЕРБАЛЬ (держреєстр. № 0104U002291) та ДБ\Шум (держреєстр. № 0108U000326) НУ „Львівська політехніка”, що підтверджено відповідним актом;

3) удосконалено метод розчеплення кон'юнктернів на основі розробленого маскового зображення, що дає змогу зменшити витрати обчислювальних ресурсів, а використання додатково шістнадцяткової системи числення дає змогу розширити коло задач, які можна розв'язати без застосування комп'ютера;

4) результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі в Національному університеті „Львівська політехніка”, що підтверджено відповідним актом.

Особистий внесок здобувача. Усі перелічені вище наукові результати дисертаційної роботи автор отримав самостійно. У співавторстві опубліковано праці [2] (у якій дисертантові належить процедура перетворення (кодування) довільно зображеного імпліканта), [15] (у якій дисертантові належить ідея покривати матриці розчеплення функцій системи однойменними векторами а не найдовшими), [1, 11] (у яких дисертантові належить ідея упорядковувати символні диз'юнктерни за наростанням їх потужностей, тобто починаючи з мінімальної для пришвидшення процедури спрощення сформованої множини за рахунок скорочення шляху пошуку спрощуваних диз'юнктернів), [8, 14] (у яких дисертантові належить ідея здійснювати процес сканування шляхом послідовної зміни значень кодів лічильника положень світного елемента у рядку і лічильника рядків у кадрі, що дає змогу реалізувати цифрове керування за допомогою цифрової комбінаційної схеми перетворювача кодів на базі програмованої логікової інтегральної схеми для підвищення швидкодії), [18] (у якій дисертантові належить ідея цифрового керування радіохвильовим сенсором, що дає можливість застосувати цифрову комбінаційну схему на основі програмованої логікової інтегральної схеми для керування мережею давачів). Окрім того, автором здійснено 11 одноосібних публікацій [3-7, 9, 10, 12, 13, 16, 17].

Апробація результатів. Основні результати дисертаційної роботи апробовано на таких наукових конференціях і семінарах: Міжнар. конф. TCSET'2000, TCSET'2004, TCSET'2006 і TCSET'2012 „Сучасні проблеми

радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії” (Львів-Славське, 2000, 2004, 2006, 2012 рр.), 8-й Міжнар. наук.-техн. конф. „Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР у мікроелектроніці” CADSM'2005 (Львів-Поляна, 2005), Міжнародна молодіжна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та учених "Молодёжь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2006", Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (UkrMiCo'2019/UkrMiCo'2019).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи опубліковані у 18 наукових працях, а саме: 10 статей у наукових фахових виданнях згідно з переліком МОН України [1 - 10] (з них 1 в SCOPUS [1], 7 написано одноосібно), 1 патент України на корисну модель [18], а також 7 праць у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій [11 - 17] (з них 4 в SCOPUS, 4 написано одноосібно).

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг роботи становить 201 сторінку, з яких 167 сторінок основного тексту. Робота містить 51 рисунок, 3 додатки на 13 сторінках. Список використаних джерел містить 112 найменувань на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито сутність і розглянуто стан науково-технічної задачі, обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, об'єкт і предмет досліджень, викладено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, наведено відомості про публікацію та апробацію цих результатів, зазначено особистий внесок здобувача щодо робіт, виконаних у співавторстві.

У **першому розділі “Перспективні методи мінімізації булових функцій для проектування цифрових комбінаційних пристроїв”** проведено аналіз літературних джерел щодо питання порівняння довільних булових базисів за критерієм складності булових функцій в класі формул. З аналізу стало зрозуміло, що хоча існують булові функції, які можна реалізувати в певних базисах простіше ніж в інших, проте складність майже всіх булових функцій в класі формул асимптотично не залежить від базису. Аналіз літератури також показав, що є попарно непорівнювані базиси, але при цьому будь-який базис є порівнюваний із буловим базисом {I, ЧИ, НЕ} (кон'юнкція, диз'юнкція, інверсія). Причому базис {I, ЧИ, НЕ} є “найгірший” з точки зору кошту реалізації формул. І за цим параметром попарно порівнювані базиси утворюють спадаючі ланцюжки. Крім того вже доведено існування нескінченно суворо спадної послідовності базисів та відсутність мінімальних базисів. Аналіз літератури виявив, що переважна більшість практичних задач стосується реалізації булових функцій в базисі {I, ЧИ, НЕ}, у тому числі для проектування цифрових пристроїв на базі програмованих логікових інтегральних схем. Враховуючи викладене для подальших досліджень із довільних булових базисів обрано базис {I, ЧИ, НЕ}.

На підставі аналізу літературних джерел щодо підходів до мінімізації булових функцій виявлено, що переважна більшість методів мінімізації оперує символічними зображеннями кон'юнктернів, зокрема, у псевдотрійковому поданні, що ускладнює комп'ютерну реалізацію цих методів. Серед сучасних методів мінімізації булових функцій як перспективні для подальших досліджень щодо оптимізації комп'ютерної реалізації обрано метод розчеплення кон'юнктернів, мінімаксний метод покриття таблиці простих кон'юнктернів та метод побітового вирощування дерева простих кон'юнктернів.

У другому розділі **“Теоретичні засади оптимізації алгоритмів мінімізації булових функцій”** запропоновано шляхи зменшення обчислювальних витрат як для комп'ютерної реалізації досліджуваних методів мінімізації булових функцій так і для реалізації обчислень вручну.

Розглянуто форми подання кон'юнктернів булових функцій. Виявлено, що символічне подання, у тому числі псевдотрійкове, призводить до ускладнення комп'ютерної реалізації розглянутих методів. Запропоновано маскове зображення кон'юнктерма, що являє собою пару чисел.

Для переходу до маскового зображення з псевдотрійкового необхідно в псевдотрійковому зображенні кон'юнктерма замінити нулі “0” одиницями “1”, символи поглинання (риски “-”) замінити нулями “0”. Це буде двійкове подання маски літералів вихідного кон'юнктерма (рисунок 1). Двійкове подання маски літералів інтерпретуємо як двійкове число.

Кон'юнктерм	(0 1 - 1 -)
Маска літералів	[l l - l -]
Двійкова маска літералів	1 1 0 1 0
Маскове зображення кон'юнктерма	(0 1 0 1 0) ₁₁₀₁₀

Рисунок 1 – Формування маскового зображення кон'юнктерма

Друге число, двійкове зображення кон'юнктерма, одержуємо замінивши у псевдотрійковому зображенні кон'юнктерма риски “-” нулями “0”. Також інтерпретуємо це двійкове зображення кон'юнктерма як двійкове число.

Введено поняття маскового зображення кон'юнктерма як числового зображення із маскою.

Для порівняння кон'юнктернів “вручну” зручніше перетворити двійкові числа у вісімкові чи шістнадцяткові. Для наведеного на рисунку 1 прикладу одержимо у вісімковій системі числення маскове зображення (12_{32}) , а в шістнадцятковій – (A_{1A}) .

Для деяких методів мінімізації булових функцій, зокрема для методу побітового вирощування, необхідно спочатку відсортувати множину мінтернів за зростанням їх двійкових кодів. З цією метою обрано та удосконалено метод побітового сортування множини цілих чисел для випадку, коли ця множина позбавлена тавтології. Розглянемо суть методу. Нехай найбільше ціле число, з тих що потрібно посортувати, має n біт у двійковому поданні. Вважатимемо числа мінтермами функції від n змінних. Сортування починаємо зі старшого біту.

Модифікація полягає у здійсненні підрахунку кількості кон'юнктерів в кожній з двох підмножин, одержаних під час сортування за певним бітом. Якщо кількість кон'юнктерів в підмножині дорівнює 2^j , де j – номер біта, по якому здійснюється сортування, то в цій підмножині всі кон'юнктерми склеюються. В утвореному кон'юнктермі поглинуті всі біти, молодші від j . Замінюємо підмножину кон'юнктермом з поглинутими молодшими бітами. Продовжуємо сортування іншої підмножини за наступним бітом. Після завершення сортування відновлюємо список мінтермів з кон'юнктермів, що мають поглинуті змінні. Для цього достатньо для кожного кон'юнктерма послідовно згенерувати цілі числа від нуля до $(2^r - 1)$, де r – кількість поглинутих бітів, і дописати до кожного одержаного числа старші біти, що не були поглинуті у розглянутому кон'юнктермі. Проілюструємо це на прикладі маски літералів чотирибітних чисел. На рисунку 2 зображено дерево побітового сортування. Літерал, що може набувати значення нуль “0” чи одиниця “1”, позначатимемо літерою l . Тоді $l_3l_2l_1l_0$ – маска літералів вихідної множини B (перший рядок на рисунку 2). Сортування за третім бітом дає підмножини B_0 і B_1 (другий рядок на рисунку 2). Множина B_0 складається з елементів множини B , що мають нуль в третьому біті. Відповідно, $0l_2l_1l_0$ – маска літералів множини B_0 . Множина B_1 складається з решти елементів множини B , тобто з тих, що містять одиницю в третьому біті. Відповідно, $1l_2l_1l_0$ – маска літералів множини B_1 . Якщо потужність підмножини B_0 дорівнює 2^3 , то вилучаємо її з подальшого розгляду. А замість неї записуємо кон'юнктерм $(0 - - -)$. Аналогічно, множини B_1 замінюємо на кон'юнктерм $(1 - - -)$, якщо її потужність дорівнює 2^3 . Якщо якась з підмножин не склеїлась, до неї застосовуємо процедуру сортування за наступним бітом.

$l_3l_2l_1l_0$															
$0l_2l_1l_0$ Якщо $ B_0 = 2^3$, то існує $(0 - - -)$								$1l_2l_1l_0$ Якщо $ B_1 = 2^3$, то існує $(1 - - -)$							
$00l_1l_0$ (00 - -) при $ B_{00} = 2^2$				$01l_1l_0$ (01 - -) при $ B_{01} = 2^2$				$10l_1l_0$ (10 - -) при $ B_{10} = 2^2$				$11l_1l_0$ (11 - -) при $ B_{11} = 2^2$			
$000l_0$ (000 -)		$001l_0$ (001 -)		$010l_0$ (010 -)		$011l_0$ (011 -)		$100l_0$ (100 -)		$101l_0$ (101 -)		$110l_0$ (110 -)		$111l_0$ (111 -)	
0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Рисунок 2 – Дерево побітового сортування зі склеюванням на прикладі чотирибітної маски літералів

Набула подальшого розвитку процедура спрощення множини символічних диз'юнктермів, яка є одною з двох основних процедур теоретико-множинної модифікації мінімаксного методу покриття булових функцій, що виконуються на кожному кроці покриття. Удосконалення базується на попередньому упорядкуванні множини символічних диз'юнктермів за наростанням їхніх потужностей, що дає змогу видозмінити алгоритм процедури спрощення так, щоб скоротити шлях пошуку тих символічних диз'юнктермів, які поглинають інші, та вилучити їх з розгляду. При цьому загальна кількість порівнянь N_{SMPLI} є сумою перших N членів арифметичної прогресії $1, 2, 3, \dots, N$:

$$N_{SMPLI} = \frac{1 + N}{2} * N = \frac{N^2}{2} + \frac{N}{2} \quad (1)$$

У разі великої потужності множини символічних диз'юнктерів, можна вважати:

$$\frac{N^2}{2} \gg \frac{N}{2} \quad (2)$$

Тому

$$N_{SMPLI} \approx \frac{N^2}{2} \quad (3)$$

Кількість операцій в процедурі спрощення зменшується практично вдвічі. А ця процедура виконується на кожному кроці покриття.

Запропоновано спосіб спрощення процедури покриття таблиці простих кон'юнктерів булової функції. Цей спосіб враховує взаємні перетини простих кон'юнктерів циклічної частини для побудови ланцюжків кон'юнктерів. При цьому виділяється клас задач, які можна розв'язати без перебору, який характеризується комбінаторною складністю.

Розглянемо випадок, коли кожен стовпець циклічної частини таблиці простих кон'юнктерів має вагу 2 і при цьому всі кон'юнктерми мають однаковий ранг. За таких умов кон'юнктерми циклічної частини утворюють ланцюг в двійковому просторі. При цьому рядки таблиці кон'юнктерів є ланками цього ланцюга, а стовпці таблиці є осями ланцюга. Упорядкуємо множину кон'юнктерів за ходом слідування ланок в ланцюгу за такою процедурою:

1) шукаємо рядок таблиці з вагою 1. За відсутності такого обираємо перший рядок. Присвоюємо цьому кон'юнктерму перший номер;

2) в обраному рядку починаючи зліва шукаємо одиницю, що ще не викреслена. обираємо стовпець знайденої одиниці, а рядок при цьому викреслюємо (вилучаємо з подальшого розгляду);

3) в обраному стовпці шукаємо іншу одиницю, що ще не викреслена. Обираємо рядок знайденої одиниці. Цьому кон'юнктерму присвоюємо наступний номер, а стовпець при цьому викреслюємо (вилучаємо з подальшого розгляду);

4) якщо немає інших невикреслених рядків, то упорядкування завершено. Якщо є ще невикреслені рядки, то переходимо до пункту 2.

Покриття такої впорядкованої множини є тривіальним, а саме:

— якщо на першому кроці упорядкування вибрано рядок із вагою 2, то є два рівноцінні розв'язки. Перший розв'язок складається з кон'юнктерів, що мають непарні номери. У другому розв'язку всі кон'юнктерми з парними номерами;

— якщо на першому кроці упорядкування вибрано рядок із вагою 1 і при цьому циклічна частина містить непарну кількість кон'юнктермів, тоді розв'язок складається з кон'юнктермів, що мають парні номери;

— якщо на першому кроці упорядкування вибрано рядок із вагою 1 і при цьому циклічна частина містить парну кількість кон'юнктермів m , тоді існує $m/2$ рівноцінних розв'язків. Формування кожного розв'язку починаємо з того, що обираємо кон'юнктерм з деяким парним номером p ($1 < p \leq m$). Наступним кроком заносимо до цього розв'язку всі кон'юнктерми із парними номерами k , що не більші за p ($1 < k \leq p$). Потім заносимо до цього ж розв'язку всі кон'юнктерми із непарними номерами l , що більші за p ($p < l < m$).

Розглянемо складніший випадок, коли кожен стовпець циклічної частини таблиці простих кон'юнктермів має вагу 2, але це кон'юнктерми різних рангів. За таких умов кон'юнктерми циклічної частини теж утворюють ланцюг в двійковому просторі. За описаною вище процедурою можна дістати набір тупикових диз'юнктивних нормальних форм, проте ці розв'язки можуть мати різний кошт реалізації. Мінімальним буде розв'язок з найменшою сумою рангів кон'юнктермів, що в нього входять.

Якщо ж в циклічній частині таблиці простих кон'юнктермів є стовпці з вагою більше два, то наведена вище процедура в такому стовпці прийде до точки розгалуження ланцюга. Необхідно прийняти рішення про розрив ланцюга. Для цього обираємо кон'юнктерм найменшої ваги з тих, що покривають розглянутий стовпець. Таким чином формування одного ланцюга буде завершено, а покриття тих, що виходять з точки розгалуження може виконуватись в паралельних процесах. У цьому випадку не можна гарантувати точний розв'язок. Цей алгоритм є евристичний.

У третьому розділі **“Розроблення та удосконалення алгоритмів процедур та методів мінімізації булових функцій”** на основі маскового зображення кон'юнктермів, побітового сортування зі склеюванням та модифікованої процедури спрощення множини символічних диз'юнктермів запропоновано нові та удосконалено відомі алгоритми методів мінімізації булових функцій.

У алгоритмі розчеплення кон'юнктермів запропоновано виконувати процедуру розчеплення в числовій формі з використанням маскового зображення кон'юнктермів, що дає змогу перейти від операцій над символічними зображеннями до побітових операцій над числами.

Оскільки в матриці розчеплення в усіх кон'юнктермів одного вектора однакова маска літералів, то кожен кон'юнктерм подається одним числом, а маска літералів вказується один раз для всього вектора. Це дає змогу надалі оперувати числами замість символічних зображень. Процедура розчеплення у масковому зображенні набуває вигляду:

1) з твірної маски літералів складаємо матрицю-стовпець присутніх в ній ваг розчеплення (чисел, що відповідають вагам бітів двійкової маски літералів);

2) виконуємо побітову інверсію кожного елемента матриці-стовпця ваг розчеплення;

3) для кожного вектора обчислюємо кожен елемент матриці розчеплення операцією побітової кон'юнкції над числовим зображенням твірного кон'юнктерма та інвертованої ваги розчеплення, що відповідає цьому вектору.

Кожен процесор має апаратну реалізацію побітових операцій. Порівняно з маніпуляціями із символьними псевдотрійковими зображеннями побітові операції спричиняють значно менші обчислювальні витрати.

При здійсненні процедури розчеплення людиною “вручну” зручніше скористатись вісімковою чи шістнадцятковою системами числення замість двійкової для запису маскового зображення. Тоді запис таблиці розчеплення кон'юнктермів буде компактнішим. Крім того простіше буде шукати кон'юнктерми-копії на векторах матриці. Оскільки кожній вісімковій позиції відповідає три біти двійкового подання, а кожній шістнадцятковій позиції – чотири біти, то побітові операції над числовими зображеннями кон'юнктермів можна виконувати окремо над кожною цифрою як у вісімковому, так і в шістнадцятковому поданні. Щоб полегшити формування матриці розчеплення, складено карту розчеплення літералів функції від чотирьох змінних у поданні шістнадцятковими цифрами (рисунок 3а) і карту розчеплення літералів функції від трьох змінних у поданні вісімковими цифрами (рисунок 3б).

8-4-2-1		7	B	D	E
0000	0	0	0	0	0
0001	1	1	1	1	0
0010	2	2	2	0	2
0011	3	3	3	1	2
0100	4	4	0	4	4
0101	5	5	1	5	4
0110	6	6	2	4	6
0111	7	7	3	5	6
1000	8	0	8	8	8
1001	9	1	9	9	8
1010	A	2	A	8	A
1011	B	3	B	9	A
1100	C	4	8	C	C
1101	D	5	9	D	C
1110	E	6	A	C	E
1111	F	7	B	D	E

а – для функції від чотирьох змінних у поданні шістнадцятковими цифрами

4-2-1		4	2	1
000	0	0	0	0
001	1	1	1	0
010	2	2	0	2
011	3	3	1	2
100	4	0	4	4
101	5	1	5	4
110	6	2	4	6
111	7	3	5	6

б – для функції від трьох змінних у поданні вісімковими цифрами

Рисунок 3 – Карти розчеплення літералів

Для здійснення процедури розчеплення “вручну”, необхідно в числовій карті розчеплення (рисунок 3) вибрати рядок твірного кон'юнктерма і стовпець

ваги вектора розчеплення. На їх перетині знайдемо розчеплений кон'юнктерм в числовому поданні.

Застосування запропонованої модифікації процедури розчеплення кон'юнктермів, дає змогу знизити обчислювальні витрати. Використовуючи числове подання у вісімковій чи шістнадцятковій системі числення, можна розширити коло завдань, що розв'язуються “вручну”, тобто без залучення обчислювальної техніки.

Запропоновано зміни до алгоритму розчеплення кон'юнктермів, що полягають у зміні порядку формування матриці розчеплення з метою виявлення несуттєвих змінних за допомогою частково сформованої матриці. Це дає змогу зменшити обчислювальні витрати.

У методі розчеплення кон'юнктермів на етапі покриття матриці розчеплення можуть бути виявлені повністю покриті вектори. Такі вектори складаються лише з кон'юнктермів-копій. Це означає, що є неістотною змінна, яка відповідає повністю покритому вектору. У цьому випадку необхідно вилучити з подальшого розгляду відповідні вектори, а також неістотні змінні в кожному кон'юнктермі як твірному, так і розчепленому. Крім того необхідно вилучити з матриці по одному стовпцю з кожної пари копій, що знайдені на повністю покритому векторі. Продовжити процедуру покриття можна тільки після вилучення всіх знайдених в такий спосіб неістотних змінних.

Можна скоротити обсяг обчислювальних витрат, якщо формувати матрицю розчеплення по рядках а не по стовпцях. Після формування кожного рядка одразу шукати пари кон'юнктермів-копій, щоб якомога швидше виявити повністю покритий вектор і вилучити неістотну змінну з подальшого розгляду. При цьому удвічі зменшиться кількість стовпців. Таким чином вдасться зменшити розмірність матриці розчеплення ще на етапі її формування і тільки тоді перейти до опрацювання наступної змінної, тобто формування наступного вектора.

При поданні кон'юнктермів масковим зображенням процедура вилучення неістотної змінної формується на основі побітових операцій, а саме:

1) для повністю покритого вектора розраховуємо побітову кон'юнкцію числового зображення кожного твірного кон'юнктерма із вагою вектора розчеплення. Якщо результат дорівнює нулю, одразу вилучаємо твірний і відповідний стовпець із матриці;

2) для твірного вектора та для кожного вектора розчеплення обчислюємо нову маску літералів як побітову кон'юнкцію старої маски літералів і ваги розчеплення вектора неістотної змінної;

3) вилучаємо повністю покритий вектор з матриці розчеплення.

На рисунку 4 наведено блок-схему удосконаленого алгоритму розчеплення кон'юнктермів. На вхід алгоритму подається вектор мінтермів (блок SCNM1). Другий блок SCNM2 викликає модуль процедури розчеплення для вхідного вектора. У третьому блоці SCNM3 інкрементується лічильник векторів, що перебувають на опрацюванні. Четвертим блоком SCNM4 здійснюється

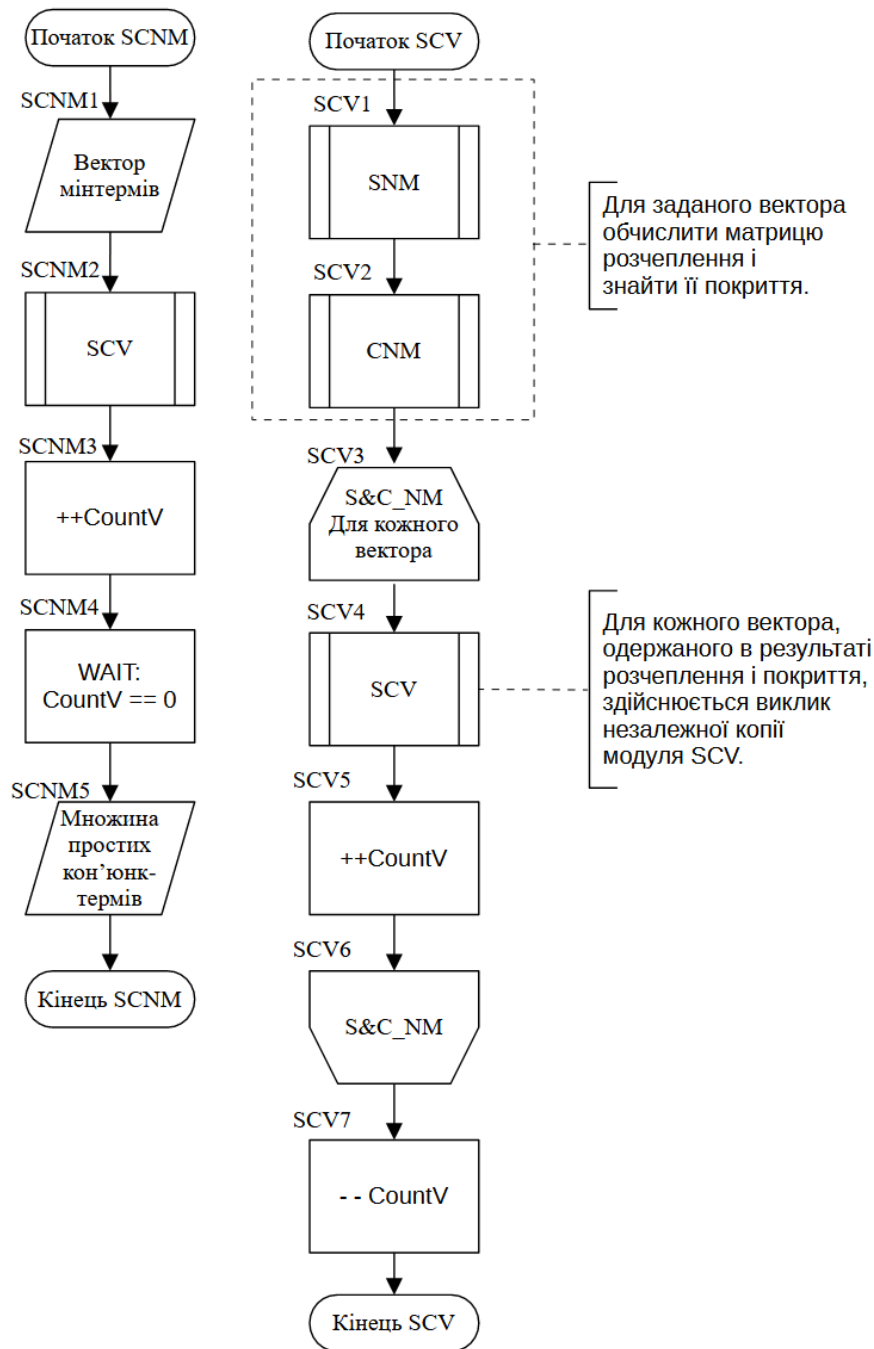


Рисунок 4 – Блок-схема удосконаленого алгоритму розчеплення кон'юнктермів

очікування завершення опрацювання всіх векторів. П'ятий блок виводить множину простих кон'юнктермів. Після чого алгоритм завершується.

Модуль процедури розчеплення SCV в першому блоці SCV1 викликає модуль удосконаленої процедури побудови матриці розчеплення. У наступному блоці SCV2 викликається модуль процедури покриття матриці розчеплення, результатом роботи якого є множина векторів розчеплення. Блок SCV3 запускає цикл опрацювання одержаних векторів. На кожній ітерації береться один з одержаних векторів. Для нього блоком SCV4 здійснюється виклик незалежної копії модуля SCV. Блок SCV5 інкрементує лічильник векторів, що перебувають на опрацюванні. Блок SCV6 завершує ітерацію циклу і переходить до блоку SCV3, тобто на початок наступної ітерації. Алгоритм виходить із циклу коли

опрацював всі вектори матриці розчеплення, що одержана з вхідного вектора. Тоді блок SCV7 декрементує лічильник векторів, що перебувають на опрацюванні. Процедура завершується. За рахунок рекурентного виклику процедури розчеплення для кожного новоутвореного вектора досягається швидке розпаралелення алгоритму.

Вперше запропоновано спосіб пошуку простих кон'юнктерів булової функції побітовим сортуванням зі склеюванням. Для подання кон'юнктерів використовується маскове зображення. Оскільки всі мінтерми мають спільну маску літералів, на вхід алгоритму подається масив чисел зі спільною маскою. Цей масив упорядковують за зростанням чисел, за наявності вилучають тавтологію. Нехай найбільше число в масиві має n бітів. Методом половинного січення розбиваємо масив на старший і молодший масиви. На рисунку 5 наведено блок-схему алгоритму опрацювання одержаних масивів. У молодшому масиві містяться всі числа менші ніж 2^{n-1} . Таким чином ми розбили множину кон'юнктерів за старшим бітом. У одній підмножині всі кон'юнктерми з нулем в старшому біті, а в другій – з одиницею. Для кожного одержаного масиву з різниці індексів першого і останнього елементів дізнаємося чи містить масив 2^{n-1} елементів. Якщо так, то такий масив склеюється по всіх молодших бітах в один кон'юнктер. При цьому в другому масиві в усіх кон'юнктермах поглинається старший біт. Якщо ні старший ні молодший масиви не склеюються, шукаємо множину кон'юнктерів, що мають символ поглинання в старшому біті. Для цього обнулюємо розглянутий біт в старшому масиві і порівнюємо найменші елементи цих масивів. Якщо вони однакові то знайшли склеювання. Тоді беремо для порівняння наступні елементи. Якщо не однакові, беремо наступний елемент в масиві того елемента який при порівнянні виявився меншим. У такий спосіб одержимо три множини кон'юнктерів заданої булової функції. У одній всі кон'юнктерми з одиницею в старшому біті. У другій всі кон'юнктерми з нулем в старшому біті. У третій всі кон'юнктерми з поглинутим старшим бітом. Кожну з одержаних множин розглядаємо окремо і в описаний спосіб розбиваємо за наступним бітом. Для уникнення тавтології запропоновано формувати маску склеювань кон'юнктерів, яка є розвитком коду помітки, що використовується в методі порозрядного вирощування. Для зменшення обчислювальних витрат уведено маску склеювань масиву кон'юнктерів, на основі якої можна вилучати з подальшого розгляду цілі масиви кон'юнктерів.

Четвертий розділ “Реалізація та застосування розроблених алгоритмів мінімізації булових функцій для проектування цифрових комбінаційних пристроїв” присвячений використанню та практичній реалізації розроблених алгоритмів. Зокрема на основі розроблених удосконалень алгоритму розчеплення кон'юнктерів, запропоновано удосконалений метод мінімізації булових функцій розчепленням кон'юнктерів.

Набув подальшого розвитку мінімаксий метод покриття у теоретико-множинній формі. Запропоновано упорядковувати символні диз'юнктерми за потужністю починаючи з мінімальної. Тоді скорочується шлях пошуку спрощуваних диз'юнктерів, а це пришвидшує процедуру спрощення сформованої множини.

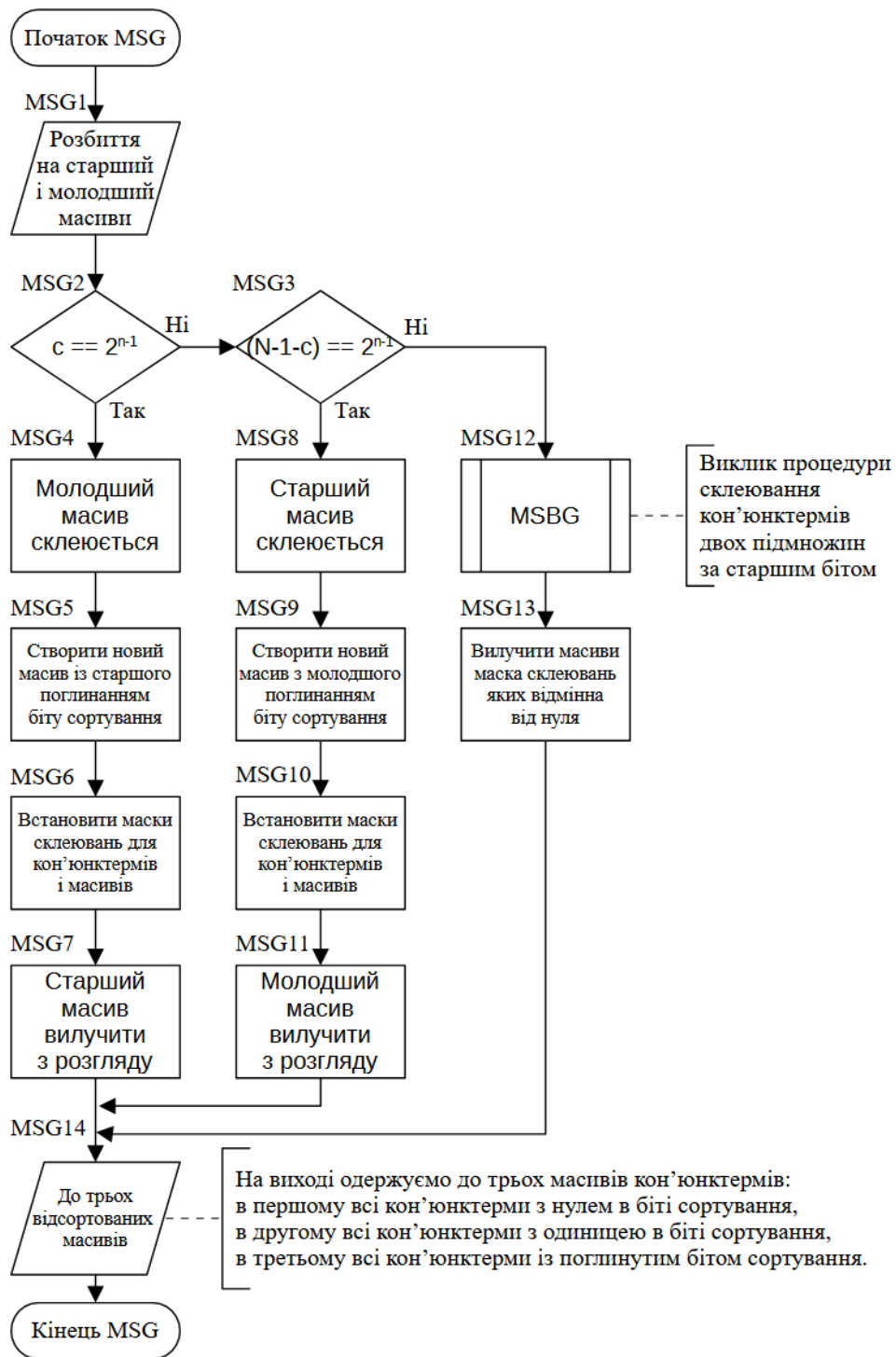


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритму склеювання масиву

Запропоновано удосконалення методу порозрядного вирішування простих кон'юнктерів. Введено процедуру виявлення підмножин, елементи яких склеюються в один кон'юнктер простим підрахунком кількості елементів ще на етапі розбиття по заданому біту. Розширено область застосування методу на недоозначені функції.

На основі розроблених процедур та алгоритмів **вперше запропоновано** метод мінімізації булових функцій побітовим розбиттям зі склеюванням. У розробленому методі мінімізації має місце швидке розбиття задачі на незалежні

підзадачі меншої розмірності. Ці підзадачі можна розв'язувати одночасно в паралельних процесах. Виконано оцінку асимптотичної складності алгоритму розробленого методу та надано рекомендації щодо області застосування. Для подальших міркувань вважатимемо, що розглядаємо множину з N кон'юнктерів булової функції від n змінних. Якщо внаслідок розбиття цієї множини по деякому біту всі елементи однієї з підмножин склеюється в єдиний кон'юнктер, тоді в кон'юнктерах другої підмножини відповідний біт є поглинутим. Таким чином верхня оцінка складності алгоритму одержання множини кон'юнктерів із поглинутим бітом розбиття дорівнює складності процедури розбиття, що дорівнює $O(\log N)$.

У іншому випадку, тобто якщо жодна з підмножин не склеїлася, для одержання множини кон'юнктерів із поглинутим бітом розбиття потрібно не більше N попарних порівнянь кон'юнктерів, а верхня оцінка складності алгоритму в цьому випадку дорівнює $O(N)$.

Задача мінімізації булової функції, що тотожна одиниці, має найвищу комбінаторну складність для більшості методів мінімізації. Для методу мінімізації побітовим розбиттям ця задача є одною з найпростіших. Для неї верхня оцінка складності дорівнює $O(\log N)$. І чим менша різниця $(2^n - N)$ в заданій буловій функції, тим більша імовірність появи в процесі розбиття таких підмножин кон'юнктерів, для яких комбінаторна складність методу мінімізації побітовим розбиттям зі склеюванням дорівнює складності процедури розбиття $O(\log N)$. Таким чином окреслюється область застосування, у якій запропонований метод дає найбільшу перевагу над іншими.

Для прикладної задачі виконано синтез перетворювача кодів запропонованими в роботі методами, серед яких метод мінімізації булових функцій побітовим розбиттям зі склеюванням показав кращий результат.

ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язано актуальне науково-практичне завдання, яке полягає в удосконаленні та розробленні алгоритмів та методів мінімізації булових функцій для проектування цифрових комбінаторних схем радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій.

1 На основі аналізу літературних джерел для подальших досліджень обрано методи мінімізації булових функцій перспективні щодо оптимізації комп'ютерної реалізації. Виявлено їх недоліки та окреслено напрями пошуку удосконалень.

2 Запропоновано числове подання кон'юнктерів довільного рангу у вигляді маскового зображення, що дає змогу використовувати в алгоритмах мінімізації булових функцій двійкові операції замість операцій над символами. Такий підхід спрощує комп'ютерну реалізацію методів мінімізації.

3 Удосконалено метод побітового сортування множини цілих чисел, що позбавлена тавтології, шляхом підрахунку елементів підмножини в процесі сортування по заданому біту з номером n , що дає змогу виявити склеювання одержаної підмножини в кон'юнктер і замінити процедуру сортування по решті

бітів простим перерахунком від 0 до 2^n-1 . Крім того, оскільки певні методи мінімізації потребують попереднього сортування множини вихідних кон'юнктерів, запропонована модифікація дає змогу одержати частину імплікантів вже на етапі сортування.

4 **Вперше запропоновано** метод мінімізації булових функцій побітовим розбиттям множини кон'юнктерів на основі розробленої модифікації побітового сортування зі склеюванням, що на відміну від існуючих дає змогу виявляти прості кон'юнктерми низького рангу без проміжних склеювань простим підрахунком кількості кон'юнктерів. Цей метод позбавлений тавтології.

5 Запропоновано процедуру ланцюгового покриття таблиці простих кон'юнктерів, яка враховує взаємне розташування кон'юнктерів в двійковому просторі, що дає змогу спростити циклічну частину таблиці простих кон'юнктерів, що в свою чергу призводить до зменшення витрат машинних ресурсів. Для зниження обчислювальної складності задачі можна розрахувати коефіцієнт складності в околі розгалуження ланцюгів і прийняти рішення про розрив ланцюга в цьому місці. Процедура ланцюгового покриття множини простих кон'юнктерів дає змогу розбивати задачу покриття на декілька обчислювальних потоків. Цей підхід є евристичний.

6 Удосконалено метод розчеплення кон'юнктерів. Запропонована модифікація процедури розчеплення кон'юнктерів на основі маскового зображення дозволяє зменшити витрати обчислювальних ресурсів, а використання додатково шістнадцяткової системи числення дає змогу розширити коло задач, які можна розв'язати без застосування комп'ютера.

7 Набув подальшого розвитку метод мінімаксного покриття в теоретико-множинній формі, а саме запропоновано упорядковувати символічні диз'юнктерми за наростанням їх потужностей, тобто починаючи з мінімальної. Це пришвидшує процедуру спрощення сформованої множини за рахунок скорочення шляху пошуку спрощуваних диз'юнктерів.

8 Удосконалено метод порозрядного вирощування простих кон'юнктерів. Для цього використано розроблене маскове зображення замість псевдотрійкового, що дало змогу оперувати числовим поданням кон'юнктерів в підмножинах з однаковою маскою, введено поняття коду помітки множини кон'юнктерів для усічення трійкового дерева вирощування простих кон'юнктерів, розроблено процедуру виявлення підмножин, елементи яких склеюються в один кон'юнктер простим підрахунком кількості елементів одразу на етапі сортування по заданому біту, розширено область застосування методу на недоозначені функції. Запропоновані зміни дають змогу розширити коло розв'язуваних задач за рахунок зменшення обчислювальних витрат та розширення області застосування методу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України, що включені до наукометричних баз даних:

1. Рицар Б.Є., Мінзюк В.В. "Теоретико-множинна модифікація мінімаксного методу покриття булових функцій", *Управляющие системы и машины*, сентябрь-октябрь 2005, № 5, С. 43-47. (Scopus)

Статті у наукових фахових виданнях України:

2. Рицар Б.Є., Мінзюк В.В. "Один спосіб зображення кон'юнктернів", Вісник Державного університету "Львівська політехніка" *"Радіоелектроніка і телекомунікації"*. – Львів, 1999. – № 367. – С. 138-142.
3. Мінзюк В.В. "Спосіб синтезування кон'юнктернів булових функцій", Вісник Національного університету "Львівська політехніка" *"Радіоелектроніка та телекомунікації"*. – Львів, 2004. – № 508. – С. 256-262.
4. Мінзюк В.В. "Спосіб спрощення задачі покриття булових функцій", Вісник Національного університету "Львівська політехніка" *"Радіоелектроніка та телекомунікації"*. – Львів, 2005. – № 534. – С. 24-28.
5. Мінзюк В.В. "Спосіб сортування цілих чисел для задач мінімізації булових функцій", Вісник Національного університету "Львівська політехніка" *"Радіоелектроніка та телекомунікації"*. – Львів, 2011. – № 705. – С. 135-137.
6. Мінзюк В.В. "Модифікація методу порозрядного вирішення простих кон'юнктивних тернів булових функцій", *Моделювання та інформаційні технології*, зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – К., 2012. – Вип. 65. – С.129-134.
7. Мінзюк В.В. "Метод пошуку простих кон'юнктивних тернів булових функцій побітовим розбиттям множини", *Моделювання та інформаційні технології*, зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – К., 2013. – Вип. 66. – С.95-103.
8. Шклярський В. І., Матієшин Ю. М., Баланюк Ю. В., Мінзюк В. В. "Алгоритмічне забезпечення роботи телевізійного сканувального оптичного мікроскопа під час дослідження динамічних мікрооб'єктів", Вісник Національного університету "Львівська політехніка" *"Радіоелектроніка та телекомунікації"*. – Львів, 2017. – № 885. – С. 15-21.
9. Мінзюк В. "Метод формування розгортки телевізійного сканувального оптичного мікроскопа", *Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*. – Львів, 2022. – Вип. 2, № 2. – С. 88-95.
10. Мінзюк В. "Метод мінімізації булевих функцій для проектування цифрових комбінаційних схем", *Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*. – Львів, 2023. – Вип. 3, № 1. – С. 146-152.

Публікації у матеріалах конференцій, що входять до складу міжнародних наукометричних баз даних:

11. Rytsar, B., Minziuk, V. "The set-theoretical modification of Boolean functions minimax covering method", *Modern Problems of Radio Engineering*,

- Telecommunications and Computer Science*. Proceedings of the International Conference TCSET'2004, 2004, pp. 46-48. (Scopus)
12. Minzyuk, V. "Modification of conjuncterms splitting method of boolean functions minimization", *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*. Proceedings of International Conference TCSET'2006, 2006, pp. 81-82. (Scopus)
 13. Minzyuk, V. "Integers sorting method for boolean functions minimization", *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*. Proceedings of the International Conference TCSET'2012, 2012, p. 61. (Scopus)
 14. Matiieshyn, Y., Minziuk, V., Mankovskyy, S. "Algorithmic support of the television scanning optical microscope in the study of microobjects", *The Fourth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics*. Proceedings of the International Conference UkrMiCo'2019, 2019, 9165398, pp. 368-373. (Scopus)

Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій:

15. Rytsar B. Ye., Minzyuk V. V., Sizonov Yu. V. "Minimization Method of Boolean Functions System", *Сучасні проблеми засобів телекомунікацій, комп'ютерної інженерії та підготовки спеціалістів*. Матеріали конференції TCSET'2000, 2000, Державний університет "Львівська політехніка", pp. 86-87.
16. Vadym Minzyuk "Technique of Boolean Functions Conjuncterms Synthesis", *Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці*. Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції CADSM'2005. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2005 – 578 с., ISBN 966-553-431-9.
17. Мінзюк В.В. "Модифікація методу порозрядного вирощування простих кон'юнктивних термів булових функцій", *Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2006* [Текст] : материалы междунар. молодеж. науч.-технич. конф. студ., аспирантов и ученых, 17-21 апреля 2006 г. / науч. ред. Ю.Б. Гимпилевич ; Севастопольский национальный технический ун-т. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2006. – 309 с.

Патенти:

18. Пат. 149637 Україна. МПК H04B1/00 H04B1/04. Радіохвильовий сенсор / В. І. Оборжицький, В. Г. Сторож, Ю. М. Матієшин, В. Г. Протасевич, В. В. Мінзюк; заявник та власник патенту Національний університет "Львівська політехніка". – № u202103668 ; заявл. 25.06.2021 ; опубл. 24.11.2021, Бюл. № 47.

АНОТАЦІЯ

Мінзюк В. В. Розроблення та дослідження оптимальних алгоритмів мінімізації булових функцій у довільному логіковому базисі для проектування цифрових комбінаційних пристроїв. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – «Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій». – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, м. Львів, 2024.

У дисертації розв'язано актуальне науково-практичне завдання, яке полягає в удосконаленні та розробленні алгоритмів та методів мінімізації булових функцій для проектування цифрових комбінаційних схем радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій.

Розвинуто метод розчеплення кон'юнктерів та метод порозрядного вирощування простих кон'юнктерів. Удосконалено метод мінімаксного покриття в теоретико-множинній формі. Запропоновано процедуру ланцюгового покриття таблиці простих кон'юнктерів. Удосконалено метод побітового сортування цілих чисел для множини чисел, що не містить тавтології.

Запропоновано метод мінімізації булових функцій побітовим розбиттям множини кон'юнктерів, що дає змогу виявляти прості кон'юнктерми низького рангу без проміжних склеювань.

Для прикладної задачі виконано синтез перетворювача кодів запропонованими в роботі методами, серед яких метод мінімізації булових функцій побітовим розбиттям зі склеюванням показав кращий результат.

Ключові слова: *кон'юнктерм, мінімізація булових функцій, пошук простих кон'юнктерів, покриття таблиці простих кон'юнктерів, проектування цифрових комбінаційних схем.*

ABSTRACT

Minziuk V. V. Development and research of optimal algorithms for minimizing Boolean functions in an arbitrary logical basis for the design of digital combinational devices. –Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences by specialty 05.12.13 – “Radio engineering devices and means of telecommunications”. – Lviv Polytechnic National University of Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2024.

The dissertation solves an actual scientific and practical task, which is to improve and to develop algorithms and methods of minimizing Boolean functions for designing digital combinational circuits of radio engineering devices and telecommunications equipment.

A numerical representation of conjuncterms of arbitrary rank is proposed in the form of a pair of numbers: a binary image and a binary mask of literals. The binary image is obtained by replacing the absorption symbols “–” with zeros in the pseudo-ternary image. To obtain a literal mask, we first replace zeros in the ternary image with ones, and then the absorption symbols “–” with zeros. Since gluing is possible only between conjuncterms with the same literal mask, we combine such conjuncterms into sets. Now you can denote each conjunction with only one number, and specify the literal mask with a single number for the entire set. This will allow the use of binary operations in algorithms for minimizing Boolean functions instead of operations on

symbols. This approach simplifies the computer implementation of minimization methods.

The splitting conjuncterms method has been developed. A modification of the procedure for splitting conjuncterms based on the proposed numerical representation, which makes it possible to reduce the amount of used computing resources, and the additional use of hexadecimal number system allows one to expand the range of problems that can be solved without the use of a computer.

The method of bitwise cultivation of primes has been developed. The developed numeric representation was used instead of the pseudo-ternary one, which made it possible to operate with numbers instead of symbols in subsets of conjuncterms with the same literal mask. The concept of a code for marking a set of conjuncterms has been introduced to truncate the ternary tree of growing primes. A procedure has been introduced for detecting a subset, the elements of which are glued together into one conjuncterm by simply counting the number of elements immediately at the stage of sorting by a given bit. The scope of application of the method for not fully defined functions has been expanded. The proposed changes make it possible to expand the range of problems to be solved by reducing computational costs and expanding the scope of the method.

The minimax coverage method in the set-theoretic form has been improved. It is proposed to arrange symbolic disjuncterms according to the increase in their powers, that is, starting from the minimum. This speeds up the procedure for simplifying the generated set by shortening the search path for simplifying disjuncterms.

The procedure for chain coverage of the table of primes is proposed. This procedure takes into account the relative position of conjuncterms in binary space, which makes it possible to simplify the cyclic part of the table of simple conjuncterms. This leads to a reduction in the amount of used computing resources. To reduce the computational complexity of the problem, you can calculate the complexity coefficient in the vicinity of the chain branch and make a decision about breaking the chain at this place. The chain covering procedure for a set of simple conjuncterms makes it possible to split the covering problem into several computational threads. The proposed approach is heuristic.

The method of bitwise sorting of integers for a set of numbers that does not contain tautologies has been improved. In the process of partitioning by a given bit with number n , the elements of the subset are counted, which makes it possible to identify the gluing of the resulting subset into a conjuncterm and replace the sorting procedure by the remaining bits by simply calculating from 0 to 2^n-1 . In addition, since certain minimization methods require preliminary sorting of a set of initial conjuncterms, the proposed modification makes it possible to obtain part of the implicants already at the sorting stage.

The method of minimizing Boolean functions by bitwise partitioning of a set of conjuncterms has been developed. The method makes it possible to find low rank primes without intermediate gluings.

For the applied problem, the synthesis of the code converter was performed using the methods proposed in the paper, among which the method of minimizing Boolean functions by bitwise partitioning with gluing showed the best result.

Keywords: conjuncterm, minimization of Boolean functions, search for primes, coverage of the table of primes, design of digital combinational circuits.

Підписано до друку 08.05.2024 р.
Формат 60×90 1/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 1,5. Обл.-видав. арк. 0,89.
Тираж 100 прим. Зам. 240494.

Поліграфічний центр
Видавництва Національного університету “Львівська політехніка”
вул. Ф.Колесси, 4, 79013, Львів
Реєстраційне свідоцтво серії ДК № 4459 від 27.12.2012 р.