

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Мінзюка Вадима Володимировича на тему «Розроблення та дослідження оптимальних алгоритмів мінімізації булових функцій у довільному логіковому базисі для проектування цифрових комбінаційних пристроїв», яку подано на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – «Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій»

**1. Актуальність теми дисертації.** Із розвитком мікроелектроніки зростає ступінь інтеграції цифрових пристроїв. З одного боку це призводить до зростання їх можливостей і більшого проникнення цифрових технологій в різні сфери нашого життя. З іншого боку виникає потреба нових підходів до проектування цих пристроїв, оскільки відомі методи вже не справляються з опрацюванням настільки великих обсягів даних, що використовуються для опису функцій, які можуть реалізовувати сучасні цифрові пристрої великого ступеня інтеграції. Для опису цифрових пристроїв використовують математичний апарат алгебри логіки. Одну й ту саму функцію алгебри логіки можна реалізувати різними формулами булової алгебри, які можуть містити різну кількість операцій, а значить при втіленні їх апаратно будуть використовувати різну кількість вентилів на кристалі мікросхеми (тобто може бути різний кошт реалізації). Одне з ключових завдань проектування цифрових пристроїв — знайти якомога менший кошт реалізації логікової функції. Цю задачу розв'язують за допомогою методів мінімізації булових функцій.

Отже, розроблення та удосконалення методів мінімізації булових функцій шляхом розвитку відомих та винайдення нових способів подання та алгоритмів перетворення функцій алгебри логіки є актуальним науково-практичним завданням при проектуванні цифрових комбінаційних схем засобів телекомунікацій та радіотехнічних пристроїв.

**2. Структура та зміст дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і 3 додатків. Загальний обсяг роботи 201 сторінка, з них 167 сторінок — основний текст. Дисертація містить 51 рисунок. Список використаних джерел нараховує 112 найменувань

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету, завдання, методи, об'єкт та предмет дослідження, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, висвітлено особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів, наведено дані про публікації та апробацію результатів дисертації, надано інформацію про структуру та обсяг роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз літературних джерел, в яких розглянуто порівняння довільних булових базисів за критерієм складності булових функцій в класі формул. За результатами цього аналізу із довільних булових базисів обрано для подальших досліджень буловий базис  $\{I, \text{ЧИ}, \text{НЕ}\}$  (кон'юнкція, диз'юнкція, інверсія).

Аналіз літературних джерел щодо підходів до мінімізації булових функцій дав змогу автору кандидатської дисертації виявити недоліки відомих методів мінімізації, окреслити шляхи їх подолання та обрати серед сучасних методів мінімізації булових функцій як перспективні для подальших досліджень метод розчеплення кон'юнктерів, мінімаксий метод покриття таблиці простих кон'юнктерів та метод побітового вирощування дерева простих кон'юнктерів.

**Другий розділ** присвячений розробленню шляхів зменшення обчислювальних витрат як для комп'ютерної реалізації досліджуваних методів мінімізації булових функцій так і для реалізації обчислень вручну. Запропоновано відмовитися від символного подання кон'юнктерів на користь числового подання. Для цього розроблено маскове зображення кон'юнктерів, що являє собою пару чисел, одне з яких є однаковим для кон'юнктерів, що мають спільну маску літералів. Тоді операції з кон'юнктерами набувають вигляду операцій із числами, замість операцій із символами, що призводить до зменшення обчислювальних витрат комп'ютерної реалізації задачі мінімізації булової функції. І навіть при здійсненні мінімізації «вручну» числове подання виявилось зручнішим для сприйняття людиною, ніж символне подання.

В методі побітового вирощування дерева простих кон'юнктермів необхідно сортувати множину мінтермів за зростанням їх числових кодів. Для цього обрано та удосконалено метод побітового сортування чисел. Модифікація полягає в тому, що під час сортування за певним бітом здійснюється підрахунок кількості елементів у кожній з двох одержаних підмножин. Якщо кількість елементів становить  $2^n$ , де  $n$  — кількість молодших бітів, за якими ще не здійснювалося сортування, то подальше сортування замінюється простим перерахунком від 0 до  $2^n-1$ . Так одержують молодші біти відсортованих за зростанням чисел. Їх старші біти однакові для всіх чисел одержаної послідовності та відомі з попередніх кроків сортування за старшими бітами. Такий підхід дає змогу одержати імпліканти із поглинутим набором молодших бітів ще на етапі підготовки множини кон'юнктермів до мінімізації.

Запропоновано розвиток процедури спрощення множини символічних диз'юнктермів для подальшого використання у мінімаксному методі покриття таблиці простих кон'юнктермів булових функцій.

Запропоновано спосіб спрощення процедури покриття таблиці простих кон'юнктермів булової функції. Цей спосіб враховує взаємні перетини простих кон'юнктермів циклічної частини для побудови ланцюжків кон'юнктермів. Окреслено клас задач, які можна розв'язати за допомогою запропонованої процедури ланцюгового покриття без застосування перебору.

У **третьому розділі** на основі результатів, отриманих у попередньому розділі, розроблено та удосконалено алгоритми процедур та методів мінімізації булових функцій. Зокрема, удосконалено алгоритм процедури розчеплення кон'юнктермів, запропоновано алгоритм усунення несуттєвих змінних, удосконалено алгоритм порозрядного вирощування простих кон'юнктермів, розроблено алгоритм пошуку простих кон'юнктермів побітовим розбиттям множини кон'юнктермів, розвинуто алгоритм теоретико-множинної модифікації мінімаксного методу покриття булових функцій.

**Четвертий розділ** присвячений реалізації та застосування розроблених алгоритмів мінімізації булових функцій для проектування цифрових комбінаційних пристроїв. Зокрема, удосконалено метод розчеплення

кон'юнктерів, розвинуто теоретико-множинну модифікацію мінімаксного методу покриття булових функцій, удосконалено метод порозрядного вирощування простих кон'юнктерів, уперше запропоновано метод мінімізації булових функцій побітовим розбиттям множини кон'юнктерів та покриттям ланцюгами. За допомогою запропонованих методів синтезовано макромоделі перетворювача кодів. Виконано порівняння результатів синтезу цифрових комбінаційних пристроїв, що одержані із застосуванням запропонованих методів мінімізації.

**Додатки** містять акти впровадження та використання результатів дисертаційної роботи, блок-схеми алгоритму та опис методу розчеплення кон'юнктерів, блок-схему та опис процедури зважування символічних диз'юнктерів.

### **3. Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі:**

1) уперше 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'юнктери низького рангу без проміжних склеювань простим підрахунком кількості кон'юнктерів. Для пошуку тупикових диз'юнктивних нормальних форм запропоновано процедуру ланцюгового покриття множини простих кон'юнктерів, що дає змогу розбивати задачу покриття на декілька обчислювальних потоків;

2) удосконалено метод порозрядного вирощування простих кон'юнктерів. Для цього використано розроблене маскове зображення замість псевдотрійкового, що дало змогу оперувати числовим поданням кон'юнктерів у 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 не повністю визначені функції;

3) удосконалено метод побітового сортування множини цілих чисел, що позбавлена тавтології, шляхом підрахунку елементів підмножини у процесі сортування по заданому біту з номером  $n$ , що дає змогу виявити склеювання одержаної підмножини у кон'юнктерм 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 заданих кон'юнктермів, запропонована модифікація дає змогу одержати деякі імпліканти вже на етапі сортування;

4) набув подальшого розвитку метод мінімаксного покриття у 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'юнктермів.

#### **4. Практичне значення результатів, отриманих в дисертаційній роботі:**

- у Львівському центрі ІКД НАН та ДКА України для проєктування цифрової комбінаційної схеми на базі програмованої логікової інтегральної схеми використано метод мінімізації побітовим розбиттям множини кон'юнктермів. Виготовлено прототип спроектованої цифрової комбінаційної схеми для керування мережею радіохвильових сенсорів. Експериментальне дослідження підтвердило точність реалізації заданих логікових функцій, що зазначено у відповідному акті;

- у ТзОВ «Міта-Техніка» використано удосконалений метод розчеплення кон'юнктермів для проєктування універсального сигнального перетворювача промислової автоматики. Кількість використаних комірок ПЛІС на 5% менша, ніж при застосуванні інших методів мінімізації. У вивільненій області реалізовану функцію самоконтролю. Результати засвідчує відповідний акт;

- у НУ „Львівська політехніка” у держбюджетній науково-дослідній роботі держреєстр. № 0104U002291 виконано порівняльний синтез макромоделей перетворювача кодів із використанням розробленого числового зображення кон'юнктермів булових функцій, удосконаленого методу мінімізації булових функцій розчепленням кон'юнктермів, удосконаленого методу побітового

вирощування простих кон'юнктернів булових функцій, що підтверджує відповідний акт;

- у НУ „Львівська політехніка” у держбюджетній науково-дослідній роботі держреєстр. № 0108U000326 для задачі кластеризації даних використано модифікацію методу побітового сортування цілих чисел, метод мінімізації булових функцій побітовим сортуванням зі склеюванням, що підтверджує відповідний акт.

**5. Відповідність дисертації встановленим вимогам.** Дисертаційна робота Мінзюка В.В. відповідає паспорту спеціальності 05.12.13 – «Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій», написана чіткою мовою, що прийнята у науково-технічній літературі. Автореферат достатньо повно розкриває зміст дисертації. Стил ь викладу результатів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій, забезпечує доступність їх сприйняття, а велика кількість рисунків сприяє кращому розумінню матеріалів роботи. Оформлення дисертації та автореферату відповідають вимогам МОН України щодо дисертаційних робіт.

**6. Повнота викладу результатів дисертаційної роботи в опублікованих працях.** Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані та апробовані у 18 наукових працях, з них 10 статей у наукових фахових виданнях згідно з переліком МОН України (серед яких 1 у науковому фаховому виданні України, що індексується міжнародною науко-метричною базою SCOPUS, 7 написано одноосібно), 1 патент України на корисну модель, 7 праць у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій (з них 4 індексуються міжнародною науко-метричною базою SCOPUS, 4 написано одноосібно).

В опублікованих працях у повному обсязі викладено основні положення дисертаційної роботи. Підтверджено особистий внесок дисертанта у працях, що написані у співавторстві. Рівень та кількість опублікованих праць відповідають вимогам, що висувають до кандидатських дисертаційних робіт в Україні.

## **7. Зауваження до дисертаційної роботи.**

1. Тривалий час дослідники і розробники методів мінімізації логікових функцій порівнювали власні розробки із методом Espresso, який дефакто був еталоном. В пропонованій дисертаційній роботі метод Espresso лише згадується в першому розділі. На мою думку доцільно було би порівняти запропоновані в дисертаційній роботі методи мінімізації із методом Espresso.

2. В запропонованому удосконаленому методі побітового сортування двійкових чисел не зрозуміло, в якій формі зберігається проміжний результат сортування, коли деяка множина чисел може бути замінена одним кон'юнктермом. На мій погляд доцільно одразу розташувати числа такої множини за наростанням чисел замість того, щоб записувати кон'юнктерм.

3. У пункті 2.5 запропоновано точний спосіб пошуку мінімального покриття таблиці простих кон'юнктермів ланцюгової функції та фрагментів ланцюгової функції. Після цього запропоновано евристичну процедуру ланцюгового покриття циклічної частини таблиці простих кон'юнктермів. Не зрозуміло, чому автор не шукає шляхів точного розв'язування.

4. Блок-схема алгоритму удосконаленої процедури покриття матриці розчеплення кон'юнктермів розбита на два рисунки (3.9 та 3.10), що ускладнює її сприйняття. Доцільно було би перенести цю блок-схему у додатки і реалізувати на аркуші формату А3.

5. В пункті 3.2 одне із запропонованих удосконалень алгоритму порозрядного вирощування простих кон'юнктермів дає змогу застосовувати удосконалений метод для мінімізації не повністю визначених функцій. Але наведено лише короткий опис нововведення. Доцільно було би детальніше пояснити внесені зміни.

6. Приклади, що наведені в розділі 4, мають досить великий обсяг обчислень, що ускладнює їх розуміння, зменшує наочність. Доцільно було би взяти для "ручних" обчислень функції з меншою кількістю змінних.

## **8. Загальні висновки.**


Дисертаційна робота Мінзюка Вадима Володимировича на тему «Розроблення та дослідження оптимальних алгоритмів мінімізації булових

функцій у довільному логіковому базисі для проектування цифрових комбінаційних пристроїв» є завершеною науковою працею, в якій отримано нові наукові та практичні результати для розв'язання актуального науково-практичного завдання удосконалення та розроблення алгоритмів та методів мінімізації булових функцій для проектуванні цифрових комбінаційних схем радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій.

Дисертаційна робота за актуальністю, рівнем, обсягом, науковою новизною та практичною цінністю відповідає вимогам положення про «Порядок присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України № 567 від 24.07.2013 року (зі змінами, внесеними згідно з постановами КМУ № 656 від 19.08.2015 року, № 1159 від 30.12.2015 року, № 567 від 27.07.2016 року), а її автор Мінзюк Вадим Володимирович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.12.13 – «Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій».

Офіційний опонент

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри засобів захисту  
інформації факультету кібербезпеки та  
програмної інженерії  
Національного авіаційного університету

 Валерій КОЗЛОВСЬКИЙ

Особистий підпис гр.  
*Валерій Козловський*  
ЗАС *ВІДІЛ*  
Начальник відділу кадрів  
Національного авіаційного університету

