РЕЦЕНЗІЯ

рецензента – професора кафедри телекомунікаційних
та радіоелектронних систем
Національного університету
«Київський авіаційний інститут»,
доктора технічних наук, професора
Соломенцева Олександра Васильовича
на дисертаційну роботу
Груданова Олександра Миколайовича
«Методи проєктування енергоефективної двопортової RFSRAM-пам'яті для телекомунікаційних систем»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації»
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

1 Актуальність теми дисертації

Ефективність телекомунікаційних пристроїв значною мірою залежить від характеристик їхньої мікроелектронної бази. Вбудована пам'ять забезпечує зберігання проміжних результатів оброблення сигналів та обмін даними між функціональними блоками. Для таких застосувань важливе поєднання швидкодії, помірного енергоспоживання та стійкості роботи за зміни умов експлуатації. Двопортові регістрові файли становлять практичний інтерес завдяки можливості організації окремих операцій читання і запису.

Зниження напруги живлення пам'яті потребує врахування запасу статичної завадостійкості комірок, технологічного розкиду параметрів транзисторів та часових обмежень. Тому оцінювання енергоефективності має спиратися на аналіз працездатності й характеристик конкретної реалізації. Для автоматизованого проєктування важливо також забезпечити узгодженість результатів на рівнях комірки, матриці та сформованого макросу пам'яті.

Особливу актуальність ці результати мають для відновлення і розвитку напівпровідникової галузі України та формування власної компетентності у створенні мікроелектронних IP-блоків і засобів автоматизованого

проєктування. Як показано у вступі дисертації, тематика узгоджується із пріоритетами національної науково-технологічної політики, Стратегією WINWIN до 2030 року та загальними напрямами Регламенту (ЄС) 2023/1781 («EU Chips Act») щодо розвитку екосистеми проєктування інтегральних схем. Цей зв'язок підсилює практичну значущість роботи, не означаючи участі дисертації у фінансованому проєкті Chips JU.

Дисертація О. М. Груданова присвячена розв'язанню цієї комплексної задачі шляхом поєднання схемотехнічного аналізу, статистичного оцінювання та автоматизації проєктування RFSRAM. Обрана тема є актуальною для створення енергоефективних компонентів телекомунікаційних систем на кристалі. Мета роботи та сформульовані задачі узгоджені з її предметом і науковим напрямом.

2 Наукова новизна результатів

Наукову новизну дисертації становлять п'ять взаємопов'язаних результатів, які доцільно виокремити як підхід, модель, метод і алгоритмічні та методичні положення:

1. Вперше запропоновано SNM-орієнтований підхід до вибору геометричних параметрів 8T-комірки двопортової RFSRAM з урахуванням критичної напруги живлення, розкиду порогових напруг MOS-транзисторів та граничних умов стійкості за butterfly-кривими.

2. Вперше для дослідженого класу 8T dual-port SRAM/RFSRAM-комірок експериментально обґрунтовано застосування наближеної статистичної моделі розподілу SNM, пов'язаної з розкидом порогових напруг транзисторів, та проведено її зіставлення з вимірюваннями працездатних кремнієвих зразків.

3. Удосконалено метод оцінювання мінімальної робочої напруги живлення пам'яті, який, на відміну від оцінювання лише номінального SNM, ураховує статистичні варіації параметрів транзисторів і критичні умови стійкості комірки.

4. Запропоновано алгоритмічний підхід до параметризованого формування RFSRAM-макросів типу 1R1W, який визначає послідовність

побудови матриці 8Т-комірок, інтеграції периферійних блоків та одержання взаємоузгоджених топологічних, схемних і бібліотечних представлень.

5. Набула подальшого розвитку методика післятопологічної SPICE-характеризації RFSRAM на основі rule-based екстракції паразитних R/C-параметрів, узгодження резистивного та ємнісного нетлістів і формування комбінованої RC-моделі для оцінювання часу доступу й струму споживання.

3 Обґрунтованість і достовірність одержаних результатів

Обґрунтованість наукових положень забезпечується послідовним поєднанням аналізу схем, моделювання та вимірювань. Автор використовує SPICE-моделі транзисторів, оцінює вплив геометричних параметрів на стійкість комірки й досліджує часові характеристики пам'яті за різних технологічних, температурних та електричних умов. Зіставлення butterfly-кривих із часовими діаграмами дає змогу пов'язати розрахункові оцінки з поведінкою досліджуваної схеми.

Експериментальну основу статистичного дослідження SNM становлять тестові структури 250-нм технології на 100 кристалах однієї пластини. Для двох орієнтацій комірки наведено відповідно 98 та 97 працездатних зразків. Результати опрацьовано з використанням середніх значень, медіан і стандартних відхилень. Автор зазначає обмеження обсягу вибірки для оцінювання віддалених ділянок розподілу. Це дозволяє розглядати отримані статистичні характеристики в межах проведеного експерименту.

Іншу складову експериментальної перевірки становлять дослідження виготовлених регістрових файлів у 130-нм технології. Результати функціонального і частотного тестування підтверджують працездатність досліджених реалізацій. Урахування впливу тестового тракту під час інтерпретації частотних вимірювань є обґрунтованим, оскільки характеристики зовнішніх кіл впливають на спостережувані часові співвідношення сигналів.

Порівняння моделей макросу без паразитних елементів та з екстрагованими опорами й ємностями доповнює експериментальні результати оцінкою впливу міжз'єднань. Сукупність наведених даних є достатньою для позитивної оцінки основних наукових положень дисертації.

Межі окремих досліджень визначаються використаними технологіями, конфігураціями пам'яті та умовами моделювання і вимірювань.

4 Оцінка змісту та структури роботи

Дисертація викладена на 182 сторінках і містить анотації, вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел та два додатки. Її структура відображає послідовність виконання дослідження: аналіз проблеми, вибір параметрів комірки, реалізація компілятора та перевірка отриманих макросів. Об'єкт, предмет і мету дослідження визначено чітко, сформульовані задачі послідовно пов'язують теоретичні положення, методи та їх експериментальну перевірку.

У першому розділі розглянуто місце вбудованої пам'яті в системах на кристалі, складові її енергоспоживання та способи його зменшення. Аналіз охоплює зміну напруги живлення, геометричних розмірів транзисторів, архітектури комірки та режимів роботи периферійних кіл. Розгляд технологічних варіацій пояснює необхідність статистичного оцінювання параметрів пам'яті. Порівняння цих підходів слугує методичною основою обґрунтування вибору 8T-комірки та потреби в SNM/WNM-орієнтованому оцінюванні.

Другий розділ присвячено 8T-комірці з окремими портами читання та запису. Автор досліджує статичну завадостійкість, умови запису, вплив геометрії транзисторів і розузгодження їхніх порогових напруг. Наведено результати моделювання та експериментальні розподіли SNM для двох орієнтацій тестової комірки. У розділі визначено методику оцінювання стійкості 8T-комірки та статистичну модель, які є основою подальшого аналізу режимів низької напруги живлення.

У третьому розділі викладено структуру компілятора та принципи автоматизованого формування RFSRAM. Розглянуто адресацію, керування, буферизацію, оцінювання споживаних струмів і часу доступу. Програмна реалізація використовує Lua та C++ і забезпечує формування топологічних, схемних та бібліотечних описів. Роботу маршруту проілюстровано на макросах конфігурацій 20×42 та 56×24. Важливими складовими є алгоритми параметризованого формування матриці й верхнього рівня макросу та

методика SPICE-характеризації з формуванням timing/power LIB-таблиць 5×5.

Четвертий розділ містить результати випробувань виготовлених макросів 256×72, 84×24 і 136×39, аналіз частотних обмежень та опис вбудованого самотестування. Окремо досліджено післятопологічні моделі макросу 56×24 із різним складом паразитних елементів. Порівняння результатів показує практичне значення врахування міжз'єднань під час визначення часових характеристик пам'яті. Окрему увагу приділено методиці розмежування власних часових обмежень пам'яті й обмежень тестового оточення, а також порівняльному аналізу netT, netR, netC і netRC.

Загальні висновки підсумовують виконання поставлених задач і відображають зв'язок між методичними, програмними та експериментальними результатами. Додаток А містить фрагменти програмної реалізації генератора бібліотечних файлів, а Додаток Б підтверджує використання результатів роботи в діяльності підприємства. Матеріал розділів викладено у логічній послідовності. Отже, назва роботи відповідає її змісту: методичні результати не обмежуються програмною реалізацією компілятора, а охоплюють вибір параметрів комірки, статистичне оцінювання SNM, алгоритми генерації макросу та його післятопологічну характеризацію.

5 Практичне значення та використання результатів

Практична цінність дисертації полягає у створенні компілятора пам'яті та засобів підготовки згенерованих макросів до схемотехнічної і післятопологічної перевірки. Автоматизоване формування пам'яті заданої глибини та розрядності, узгоджених топологічних і схемних описів, а також часових та енергетичних бібліотечних даних становить завершений інженерний результат.

Для розроблення телекомунікаційних систем корисними є методика вибору параметрів комірки при зниженій напрузі живлення, оцінювання технологічного розкиду та аналіз обмежень швидкодії пам'яті. Запропоновані засоби можуть використовуватися під час створення бібліотек вбудованих

регістрових файлів для систем на кристалі. Наведені приклади показують застосування методичних положень до конкретних реалізацій пам'яті.

Упровадження результатів у науково-дослідну, інженерно-проєктну та програмно-технічну діяльність ТОВ «СІЛВАКО ЮКРЕЙН» підтверджено актом № 150626/1 від 15 червня 2026 року. Акт засвідчує використання результатів під час розроблення й удосконалення RFSRAM Memory Compiler.

Результати також мають потенціал для використання в освітньому процесі бакалаврських і магістерських програм з електроніки, мікроелектроніки, схемотехніки та автоматизованого проєктування: як приклади лабораторних занять із SPICE-моделювання комірок пам'яті, оцінювання SNM/PVT, формування LIB-таблиць і аналізу post-layout RC-впливу. У дисертації не наведено відомостей про фактичне впровадження цих матеріалів у навчальні дисципліни, тому йдеться саме про можливе застосування.

6 Повнота оприлюднення результатів та особистий внесок

Основні результати дисертації оприлюднено у восьми наукових працях: чотирьох журнальних статтях, одній статті в матеріалах IEEE ELNANO та трьох публікаціях матеріалів конференцій. Чотири праці виконано одноосібно. Публікації охоплюють стійкість комірки пам'яті, екстракцію паразитних параметрів, енергоспоживання, частотну характеризацію та перевірку регістрових файлів.

Результати представлені на конференціях «ПОЛІТ. Сучасні проблеми науки», «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси», «ABIA-2025» та IEEE ELNANO-2026. У дисертації розкрито особистий внесок здобувача в постановку задач, розроблення методики, моделювання, статистичне опрацювання даних, програмну реалізацію та інтерпретацію результатів. Внесок у спільні праці конкретизовано, використані джерела наведено у списку літератури.

7 Якість викладу та оформлення дисертації

Дисертацію написано українською мовою із застосуванням фахової термінології. Схеми, топологічні зображення, таблиці й часові діаграми

доповнюють виклад і дають змогу простежити отримання результатів. Загалом матеріал викладено послідовно та достатньо повно. Водночас окремі методичні критерії вибору архітектури й перевірки параметризованого компілятора, а також представлення статистичних даних потребують докладнішого пояснення.

8 Зауваження та дискусійні питання

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу, вважаю за доцільне висловити такі зауваження:

1. У роботі розглянуто основні підходи до зниження енергоспоживання SRAM/RFSRAM, зокрема зменшення напруги живлення, оптимізацію параметрів транзисторів та використання альтернативних архітектур комірок пам'яті. Доцільно було б наприкінці Розділу 1 стисло узагальнити переваги та обмеження розглянутих підходів стосовно двопортової RFSRAM. Це зробило б виклад більш систематизованим і полегшило сприйняття подальших результатів дослідження.

2. У Розділі 2, на гістограмах SNM (рис. 2.36–2.39, с. 85–87) червоні стовпчики дефектних кристалів розміщено поряд із розподілами працездатних зразків. Хоча призначення червоного кольору пояснено в тексті, таке подання може створювати враження додаткової групи низьких значень SNM та ускладнювати сприйняття висновку щодо нормальності розподілу. Доцільно прямо зазначити, що кристали, які не пройшли функціональний контроль, не включалися до статистичного аналізу через неможливість коректного визначення SNM. Кількість таких кристалів варто подати окремо, а на гістограмах залишити дані працездатних зразків із зазначенням фактичного обсягу кожної вибірки. Це зробило б порядок формування вибірок і трактування результатів однозначними. Аналіз причин виникнення виробничих дефектів виходить за межі поставлених у дисертації задач.

3. У Розділі 3, у підрозділах 3.7.2–3.7.4 описано алгоритми побудови матриці та верхнього рівня параметризованого макросу, а також формування схемного LVS-нетліста. Було б корисно чіткіше сформулювати критерії перевірки коректності цих алгоритмів при зміні кількості слів і розрядності: які інваріанти з'єднань, адресації та відповідності layout/netlist контролюються та за яким принципом вибираються контрольні конфігурації для перевірки компілятора. Це допомогло б оцінити повноту верифікації запропонованого алгоритмічного підходу.

4. Щодо Розділу 4 та практичного значення роботи. Результати функціонального тестування пам'яті, BIST і післятопологічного моделювання мають потенціал для навчальних практикумів бакалаврів і магістрів з електроніки та автоматизованого проєктування. Проте в роботі не уточнено, які саме матеріали й у якій формі можна використати в навчальному процесі. Короткий приклад можливого лабораторного завдання або навчального модуля підсилив би висвітлення практичної цінності результатів.

5. Щодо оформлення анотацій. Перелік ключових слів є надмірно розлогим і містить загальні терміни, що не характеризують безпосередньо основні результати дисертації (зокрема «метали», «діелектрики», «рівняння», «експлуатація»). Доцільно скоротити його, залишивши ключові поняття, пов'язані з RFSRAM, 8T-коміркою, енергоефективністю, SNM/WNM, статистичними варіаціями, SPICE і паразитними RC-параметрами.

Зауваження до Розділів 1–3 стосуються насамперед повноти обґрунтування та представлення методичних результатів: критеріїв вибору комірки, формування статистичної вибірки SNM і перевірки алгоритмів параметризованого компілятора. Зауваження до Розділу 4 та анотацій мають уточнювальний характер. Вони не заперечують отриманих результатів і не змінюють загальної позитивної оцінки наукової та практичної цінності дисертації.

9 Загальний висновок

Дисертація Груданова Олександра Миколайовича «Методи проєктування енергоефективної двопортової RFSRAM-пам'яті для телекомунікаційних систем» є завершеною кваліфікаційною науковою працею, у якій розв'язано актуальну науково-технічну задачу розроблення методів автоматизованого проєктування енергоефективної двопортової пам'яті. Одержані результати мають наукову новизну, обґрунтовані проведеними дослідженнями та доведені до практичного використання.

За актуальністю теми, науковою новизною, обґрунтованістю основних положень, практичним значенням і повнотою оприлюднення результатів дисертація відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, зі змінами, та Вимогам до оформлення дисертації, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 року № 40.

Вважаю, що Груданов Олександр Миколайович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Рецензент
професор кафедри телекомунікаційних
та радіоелектронних систем
Національного університету
«Київський авіаційний інститут»,
доктор технічних наук, професор

Олександр СОЛОМЕНЦЕВ

Підпис Олександра Соломенцева засвідчую:

особистий підпис
ЗАСВІДЧУЮ
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»