РЕЦЕНЗІЯ

рецензента, кандидата технічних наук,
доцента кафедри електроніки, робототехніки
і технологій моніторингу та інтернету речей
Національного університету «Київський авіаційний інститут»
Пітерцева Олександра Андрійовича

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 та відповідність науковому напряму

У сучасних телекомунікаційних і радіотехнічних системах цифрова обробка сигналів дедалі частіше виконується спеціалізованими системами на кристалі. Для цифрових сигнальних процесорів, модемів, радіолокаційних трактів та мережевих процесорів важливими є не лише обчислювальні ресурси, а й можливість своєчасного запису і зчитування проміжних даних, коефіцієнтів, вибірок сигналу та результатів обчислень. Тому доступність енергоефективної вбудованої пам'яті з прогнозованими часовими характеристиками безпосередньо впливає на реалізовану продуктивність системи та її енергетичний баланс.

Використання двопортової пам'яті регістрового типу RFSRAM дає змогу організувати незалежні потоки читання і запису. Однак зниження напруги живлення, що є одним із головних засобів скорочення енергоспоживання, супроводжується погіршенням статичної стійкості комірок, зростанням чутливості до технологічних варіацій та паразитних параметрів. У таких умовах оцінка лише номінальних характеристик пам'яті недостатня; необхідні також моделі стабільності, процедури характеризації та перевірка результатів на рівні готової топології й виготовлених структур.

Дисертація О. М. Груданова охоплює зазначені взаємопов'язані питання для 8T-комірки та двопортових макросів RFSRAM. Такий підхід відповідає тематиці спеціальності 172, оскільки стосується електронної компонентної бази телекомунікаційних систем, від характеристик якої залежать швидкодія

й надійність цифрових радіоелектронних пристроїв. Актуальність обраної теми не викликає сумнівів.

2. Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна роботи полягає насамперед у методичних та алгоритмічних положеннях, а не у факті реалізації конкретної пам'яті або виготовлення дослідного зразка. За змістом дисертації виокремлюю п'ять основних результатів:

1. Метод SNM-орієнтованого вибору параметрів 8T-комірки, в якому величину запасу статичної завадостійкості пов'язано з геометричними параметрами критичних MOS-транзисторів, граничним станом butterfly-характеристик, розкидом порогових напруг і нижньою межею напруги живлення. Це забезпечує обґрунтований компроміс між стійкістю та енергоефективністю.
2. Статистична модель інженерного оцінювання розподілу SNM для двопортових 8T-комірок на основі припущення про розкид порогових напруг транзисторів і коефіцієнтів їх невідповідності. Експериментальне зіставлення з вимірюваннями тестових структур визначає можливості та межі застосування моделі.
3. Удосконалений метод визначення мінімальної допустимої напруги живлення, який використовує не лише номінальне значення SNM, а й оцінку статистичного запасу та критерій граничної стійкості комірки в режимі читання. Завдяки цьому зменшується ризик вибору режиму з недостатнім запасом надійності.
4. Алгоритм параметризованого формування двопортових RFSRAM-макросів за заданими глибиною, розрядністю і конфігурацією портів, який забезпечує узгодженість ієрархії базових комірок, топологічних з'єднань, схемного нетліста для LVS та вихідних бібліотечних представлень.
5. Методика післятопологічного оцінювання часових та енергетичних характеристик RFSRAM, що об'єднує rule-based екстракцію паразитних параметрів, формування узгодженого RC-нетліста та SPICE-аналіз. Вона дозволяє врахувати внесок реальних міжз'єднань у затримки, струми та час доступу до виготовлення макросу в кремнії.

У сукупності ці положення формують цілісну методичну основу дослідження характеристик двопортової інтегральної пам'яті та відрізняють науковий результат від його програмної й технологічної реалізації.

3. Обґрунтованість та достовірність наукових положень

Для перевірки запропонованих положень здобувач використав взаємодоповнювальні методи: схемотехнічне SPICE-моделювання на основі технологічних моделей MOS-транзисторів, аналіз butterfly-кривих, оцінювання статичних запасів SNM/WNM, опрацювання експериментальних вибірок, а також порівняння схемних і післятопологічних часових характеристик. Перевагою роботи є наявність переходу від параметрів одиничної комірки до характеристик функціонального макросу пам'яті.

Окрему доказову роль відіграють експериментальні результати для 8T SRAM-комірок, виготовлених за 250-нм технологією. Дослідження виконано для двох орієнтацій комірки на пластині, при цьому наведено статистичні характеристики розподілів SNM і зазначено обмеження, пов'язані з кількістю вимірювань. Цей експеримент слід відрізняти від частотної характеризації макросів регістрових файлів у 130-нм технології: йдеться про різні перевірки з різними об'єктами та вимірюваними параметрами. У дисертації ці результати використано як взаємодоповнювальні свідчення, а не як результати тотожного експерименту.

Важливим є також аналіз екстрагованих паразитних параметрів. Зіставлення базового нетліста з варіантами, які враховують опори й ємності міжз'єднань, показує вплив фізичної реалізації на часові параметри. Наявність вимірювань реальних кристалів, моделювання часових сигналів та аналізу тестового оточення забезпечує достатню основу для позитивної оцінки достовірності основних висновків у межах досліджених технологій та конфігурацій.

4. Оцінка структури та змісту дисертаційної роботи

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків; загальний обсяг поданого рукопису становить 182 сторінки. Логіка викладу послідовно веде від аналізу проблеми і фізичних обмежень комірки до параметризованих макросів та експериментальної перевірки.

У першому розділі проаналізовано призначення SRAM/RFSRAM у сучасних системах на кристалі, способи зниження споживаної потужності та компроміси між площею, швидкодією й запасом стійкості. Розгляд варіацій порогової напруги, впливу масштабування та паразитних RC-параметрів створює основу для подальших розрахунків. Для радіотехнічних застосувань

цінним є акцент на одночасній вимозі до продуктивності та енергоспоживання.

Другий розділ присвячено вибору параметрів 8T-комірки, аналізу режимів читання й запису та оцінюванню мінімальної напруги живлення. Прив'язка butterfly-критерію до часових діаграм дає можливість простежити, як зміна параметрів транзисторів впливає на працездатність комірки. Окреме дослідження експериментальних розподілів SNM доповнює схемотехнічні результати статистичною складовою.

У третьому розділі розкрито принципи формування ієрархії двопортового RFSRAM-макросу, організацію адресних трактів, блоків керування, вхідних і вихідних буферів та схемних описів. Наведено маршрут SPICE-характеризації і формування timing/power LIB-таблиць для заданих PVT-умов. Важливим результатом для цифрових систем є можливість використовувати електричні та часові характеристики пам'яті в наступних етапах інтеграції SoC.

Четвертий розділ містить результати випробувань виготовлених у кремнії макросів, дослідження впливу тестового оточення на оцінку максимальної робочої частоти, опис вбудованого самотестування BIST і порівняння післятопологічних моделей. Особливої уваги заслуговує відокремлення внутрішніх обмежень пам'яті від затримок зовнішнього вимірювального тракту – питання, істотне для метрологічної достовірності досліджень у радіоелектроніці.

5. Практичне значення та застосування результатів

Прикладне значення роботи визначається можливістю отримання параметризованих макросів RFSRAM з узгодженими фізичним, схемним і бібліотечним описами. Автоматизоване формування такого набору представлень є корисним для інтеграції вбудованої пам'яті у процесорні, телекомунікаційні та радіотехнічні SoC, де необхідно узгоджувати обмеження за частотою, часом доступу, енергоспоживанням та площею.

У дисертації наведено приклади реалізацій пам'яті RF1 20×42 і RF2 56×24, а також результати випробувань трьох конфігурацій регістрової пам'яті за 130-нм технологією. Це дає підстави оцінювати працездатність відповідних рішень на рівні фізичних зразків. Практичне впровадження засвідчено актом № 150626/1 від 15 червня 2026 року, включеним до додатка Б поданої редакції дисертації. Разом із тим результати для конкретних технологій та

умов не слід без додаткової кваліфікації ототожнювати з гарантованими характеристиками будь-якого іншого технологічного процесу.

6. Оприлюднення результатів та особистий внесок

Відповідно до відомостей, наведених у поданій редакції дисертації (с. 27), основні результати оприлюднено у восьми наукових працях: чотирьох статтях у наукових журналах, одній статті у матеріалах міжнародної конференції IEEE ELNANO, проіндексованих у Scopus, та трьох конференційних публікаціях. Чотири праці є одноосібними. Тематика опублікованих результатів охоплює параметри стійкості комірок регістрової пам'яті, енергоспоживання, паразитну екстракцію та вплив тестового обладнання на частотну характеризацію.

Особистий внесок здобувача у вступі описано через постановку дослідницьких задач, методику їх виконання, моделювання, аналіз результатів та формування висновків. Зміст публікацій і дисертаційного тексту відповідає основним напрямам проведеного дослідження.

7. Зв'язок із науковими програмами та академічна доброчесність

Тематика дисертаційної роботи відповідає напряму досліджень електронної компонентної бази та енергоефективних систем на кристалі, пов'язаних з інформаційно-комунікаційними технологіями. У вступі наведено зв'язок із національними пріоритетами науки та технологічними ініціативами ЄС; номерів державної реєстрації конкретних науково-дослідних робіт у поданому рукописі не зазначено.

У матеріалах, наданих для рецензування, міститься офіційний короткий звіт StrikePlagiarism від 16 вересня 2026 року щодо результатів автоматизованої перевірки дисертаційної роботи: оригінальність – 98,29 %, коефіцієнт подібності – 0,81 %, самоцитування – 0,23 %. У висновку Науково-технічної бібліотеки КАІ зазначено, що виявлені текстові збіги не стосуються положень наукової новизни та результатів автора, а робота може бути прийнята до розгляду спеціалізованою вченою радою. Подана на раду редакція містить також особисту декларацію автора про використання джерел.

8. Зауваження та дискусійні питання

Позитивно оцінюючи отримані наукові та практичні результати, вважаю за доцільне висловити чотири зауваження, по одному до кожного розділу дисертації.

1. До розділу 1. У підрозділі 1.1 (с. 28–31) описано роль RFSRAM у телекомунікаційних та радіотехнічних SoC, однак для більшої наочності бажано було б навести один конкретний сценарій цифрової обробки сигналів, наприклад короткочасну буферизацію відліків або проміжних результатів у DSP, і показати, які характеристики пам'яті для нього є визначальними: розрядність, двопортовість, час доступу та енергоспоживання. Такий приклад посилив би зв'язок огляду з практичними вимогами спеціальності.

2. До розділу 2. На рис. 2.27–2.32 (с. 75–77) наведено важливі результати моделювання 130-нм комірки при знижених напругах живлення. Але у підписах до цих діаграм не наведено повного набору PVT-умов, зокрема технологічного кута і температури. Було б корисно вказати ці умови у підписах або одній спільній примітці до серії рисунків. Це покращило б відтворюваність і порівнюваність результатів без необхідності додаткових розрахунків.

3. До розділу 3. У підрозділі 3.1 (с. 92–94) серед функціональних властивостей макросу зазначено режим write-through при одночасному читанні й записі за однією адресою. При цьому у роботі розглянуто також модифікацію з контролером конфліктів доступу. Для однозначної інтерпретації поведінки цифрового інтерфейсу доцільно було б коротко зіставити ці два режими, наприклад у невеликій таблиці випадків одночасного звернення до однієї адреси. Це може полегшити використання опису пам'яті в системах цифрової обробки сигналів.

4. До розділу 4 (основне зауваження). У підрозділі 4.1 (с. 135–144) наведено важливе порівняння експериментально виміряної максимальної частоти регістрового файла 84×24 (149,9 МГц) із результатами SPICE-моделювання (понад 400 МГц) та обґрунтовано вплив вихідних pad-комірок і буферів інтерфейсної плати. За часовими діаграмами на рис. 4.3 встановлено, зокрема, скорочення тривалості високого рівня сигналів приблизно на 2,4 нс. Разом із тим у роботі було б доцільно більш кількісно показати формування часового вікна коректного захоплення даних тестером. Для одного показового випадку можна було б узагальнити часові положення CLKRout і найбільш затриманого сигналу D7out на частотах 100 та 125 МГц із зазначенням запасу до моменту фіксації даних. Це наочніше відокремило б обмеження вимірювального тракту від власних часових характеристик макросу та посилило б метрологічне обґрунтування результатів без проведення додаткових випробувань у кремнії.

Перші три зауваження стосуються переважно форми та повноти представлення вже отриманих результатів. Четверте має змістовний характер і спрямоване на точніше кількісне пояснення інтерпретації частотних вимірювань. Наведені міркування не ставлять під сумнів працездатність досліджених макросів і не змінюють загальної позитивної оцінки роботи.

9. Загальний висновок

Дисертація Груданова Олександра Миколайовича «Методи проєктування енергоефективної двопортової RFSRAM-пам'яті для телекомунікаційних систем» є завершеною кваліфікаційною науковою працею, присвяченою актуальній проблемі забезпечення енергоефективності та достовірного оцінювання характеристик двопортової вбудованої пам'яті. Здобувач одержав взаємопов'язані методичні, модельні та алгоритмічні результати, а їх практична реалізація підтверджена схемотехнічним моделюванням, післятопологічним аналізом і випробуваннями виготовлених зразків.

За актуальністю, науковою новизною, рівнем обґрунтованості висновків, практичним значенням і повнотою оприлюднення результатів дисертаційна робота заслуговує позитивної оцінки. Вважаю, що її автор, Груданов Олександр Миколайович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Рецензент:

доцент кафедри електроніки, робототехніки
і технологій моніторингу та інтернету речей
Національного університету «Київський авіаційний інститут»,
кандидат технічних наук

Олександр ПІТЕРЦЕВ

Підпис Олександра Пітерцева засвідчую:

В. о. начальника ВХта Наталія Захарова

Національний університет «Київський авіаційний інститут» НАУ ВІДДІЛ КАДРОВОГО ТА ВІЙСЬКОВО-МОБІЛІЗАЦІЙНОГО ОБЛІКУ