ВІДГУК

офіційного опонента
кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника
Стіканова Валерія Юхимовича
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 дослідження

Вбудовані регістрові файли є складовою мікроелектронної бази телекомунікаційних пристроїв, у яких потрібні оперативне зберігання даних та їх незалежне читання і запис. Енергоспоживання таких блоків визначається параметрами комірки, організацією матриці й периферійних схем. Тому розроблення енергоефективної пам'яті потребує узгодженого розгляду схемотехнічних рішень та їх фізичної реалізації.

Зниження напруги живлення дає змогу зменшити динамічне енергоспоживання, проте посилює вплив розузгодження параметрів транзисторів на стійкість комірки. Зміна їх геометричних розмірів впливає також на площу, паразитні ємності та часові характеристики. Для компілятора пам'яті цей взаємозв'язок має бути врахований у процесі автоматизованого формування макросів різної конфігурації.

У дисертації О. М. Груданова досліджено саме цю задачу: вибір параметрів 8Т-комірки пов'язано з побудовою компілятора, характеризацією та перевіркою згенерованих реалізацій. Така постановка є актуальною для проєктування компонентів систем на кристалі, зокрема телекомунікаційного призначення, і відповідає науковому напряму дисертації.

2 Наукова новизна одержаних результатів

Наукову новизну роботи визначає поєднання аналізу фізичних обмежень комірки пам'яті з методами її автоматизованого проєктування. До основних результатів належить запропонований підхід до вибору геометричних параметрів 8T-комірки з урахуванням запасу статичної завадостійкості SNM, критичної напруги живлення та статистичних варіацій порогових напруг MOS-транзисторів. Аналіз butterfly-кривих використано для обґрунтування зміни параметрів транзисторів, від яких залежить стійкість комірки під час читання.

Експериментальне дослідження розподілів SNM доповнює цей підхід даними про розкид характеристик виготовлених комірок. Зіставлення результатів із розрахунками на основі коефіцієнта розузгодження порогових напруг обґрунтовує застосування статистичного оцінювання в межах досліджених вибірок. Удосконалення оцінки мінімальної напруги живлення полягає у врахуванні цього розкиду під час визначення умов статичної стійкості.

Розроблено параметризовану архітектуру компілятора RFSRAM типу 1R1W, яка об'єднує 8T-комірки, схеми адресації, керування та буферизації в автоматизований маршрут генерації пам'яті. Істотним результатом є узгодження топологічного і схемного представлень макросу та формування його бібліотечного опису на основі даних характеризації.

Подальшого розвитку набув маршрут післятопологічної верифікації RFSRAM із використанням екстракції паразитних опорів і ємностей, формування компактного RC-нетліста та SPICE-моделювання. Застосування методів екстракції, розроблених у співавторстві, до макросів пам'яті дає змогу оцінювати вплив міжз'єднань на їхні електричні характеристики. Сукупність цих результатів становить науковий внесок у методи проєктування енергоефективної інтегральної пам'яті.

3 Обґрунтованість і достовірність наукових положень

Обґрунтованість висновків забезпечується послідовним застосуванням схемотехнічного аналізу, статистичного оцінювання, топологічного проєктування та експериментальних вимірювань. Для аналізу комірок використано промислові SPICE-моделі, геометричні параметри транзисторів і коефіцієнти їх розузгодження. Результати подано для конкретних технологічних, температурних та електричних умов, що дозволяє оцінити межі застосування наведених висновків.

У дослідженні статичної стійкості зміна форми butterfly-кривих зіставляється з часовими діаграмами роботи комірки. Це дає змогу простежити зв'язок між обраною геометрією транзисторів і порушенням або відновленням коректного зчитування. Статистичні вимірювання SNM виконано на тестових структурах 250-нм технології; їхні результати доповнюють розрахункові дослідження комірок для інших розглянутих планарних CMOS-технологій.

Достовірність оцінки характеристик макросу підсилює порівняння схемних моделей з варіантами, що містять екстраговані паразитні параметри. У роботі окремо проаналізовано внески опорів та ємностей і наведено абсолютні значення часу доступу. Експериментальне тестування виготовлених регістрових файлів, включно з BIST, підтверджує працездатність досліджених реалізацій. Автор також розглядає вплив зовнішнього тестового тракту на результати частотної характеризації, що є необхідним для коректної інтерпретації вимірювань.

Наведених результатів достатньо для позитивної оцінки основних наукових положень роботи.

4 Оцінка структури та змісту дисертації

Дисертація має обсяг 182 сторінки, містить анотації, вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел і два додатки. Виклад побудовано відповідно до послідовності розроблення пам'яті: від аналізу

вимог і вибору комірки до автоматизованого формування та перевірки макросу.

Перший розділ розкриває роль SRAM/RFSRAM у системах на кристалі та систематизує способи зниження енергоспоживання. Розглянуто зміну напруги живлення, розмірів транзисторів, архітектури комірки й організації попереднього заряду. Аналіз обмежень цих підходів підводить до необхідності врахування статичної стійкості, технологічних варіацій і паразитних параметрів у єдиному маршруті проєктування.

У другому розділі наведено схему і топологію 8T-комірки з окремими портами читання та запису. Методика добору параметрів спирається на аналіз SNM, запасу завадостійкості запису WNM і розузгодження порогових напруг. Зокрема, для розглянутої оптимізації показано зміну площі комірки з 9,317 до 9,995 мкм² у зв'язку з підвищенням її стійкості. Експериментальна частина розділу містить розподіли SNM для двох орієнтацій тестової комірки та аналіз їхніх числових характеристик.

У третьому розділі методичні результати втілено у структурі та програмному забезпеченні компілятора пам'яті. Описано функціональну структуру RFSRAM, побудову SPICE-моделі, оцінювання струмів окремих блоків і формування вихідних представлень компілятора. Програмна архітектура поєднує керування генерацією мовою Lua з ядром роботи з топологічними даними мовою C++. Відокремлення технологічних описів і бібліотеки базових комірок від загальної логіки генерації створює основу для повторного використання програмних рішень. Застосування маршруту проілюстровано на макросах конфігурацій 20×42 та 56×24.

У четвертому розділі досліджено виготовлені регістрові файли конфігурацій 256×72, 84×24 та 136×39, наведено результати функціонального й частотного тестування та реалізацію вбудованого самотестування BIST. Окреме післятопологічне дослідження макросу 56×24 показує зміну часу доступу при врахуванні опорів, ємностей та їх сукупного впливу. Ці

результати підтверджують практичну необхідність включення RC-екстракції до перевірки характеристик пам'яті.

Загальні висновки відповідають поставленим задачам. Додаток А містить фрагменти реалізації генератора бібліотечних файлів, а Додаток Б — акт упровадження результатів. Структура роботи дозволяє простежити, як методичні положення використано в конкретних інженерних рішеннях.

5 Практичне значення результатів

Практична цінність дисертації полягає у доведенні досліджень комірки до програмно реалізованого маршруту генерації та характеризації макросів пам'яті. Єдина структура даних для формування топології й нетліста сприяє їх узгодженості. Формування часових та енергетичних LIB-описів забезпечує подання результатів характеризації у форматі, придатному для подальшого використання в цифровому проєктуванні.

Для розробників інтегральних схем корисними є також методика вибору параметрів комірки при зниженій напрузі, аналіз внесків функціональних блоків у споживаний струм та урахування тестового оточення при вимірюванні швидкодії. Запропоновані рішення можуть застосовуватися під час створення бібліотек вбудованої пам'яті для телекомунікаційних систем на кристалі. Їх перенесення на інший технологічний процес передбачає адаптацію технологічних описів, схемотехнічних рішень і повторну перевірку характеристик.

Використання результатів у науково-дослідній та інженерно-проєктній діяльності ТОВ «СІЛВАКО ЮКРЕЙН» підтверджено актом упровадження № 150626/1 від 15 червня 2026 року, наведеним у Додатку Б.

6 Оприлюднення результатів та особистий внесок здобувача

Результати дисертації відображено у восьми наукових працях: чотирьох статтях у наукових журналах, одній статті в матеріалах міжнародної конференції IEEE ELNANO та трьох публікаціях матеріалів конференційних доповідей. Чотири праці опубліковано одноосібно. Публікації охоплюють

основні складові дослідження, зокрема стійкість комірки, паразитні параметри топології, енергоспоживання та тестування регістрових файлів.

Результати пройшли апробацію на конференціях «ПОЛІТ. Сучасні проблеми науки», «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси», «ABIA-2025» та IEEE ELNANO-2026. У роботі визначено особистий внесок здобувача в постановку задач, розроблення методики, моделювання, програмну реалізацію та інтерпретацію результатів. Внесок у праці, виконані у співавторстві, розкрито; використані джерела наведено у списку літератури.

7 Якість викладу та оформлення роботи

Дисертацію написано українською мовою з використанням термінології мікроелектроніки та автоматизованого проєктування. Принципові схеми, топології, часові діаграми та таблиці дають змогу перевірити хід міркувань і зрозуміти запропоновані рішення. Загалом виклад є послідовним і достатнім для оцінювання результатів. Окремі уточнення позначень та підписів ілюстрацій можуть додатково полегшити читання.

8 Зауваження та дискусійні питання

Позитивно оцінюючи зміст і результати дисертації, вважаю за необхідне висловити такі зауваження.

1. До розділу 1. У підрозділі 1.3.6 після формули (1.8) (с. 39) доцільно пояснити фізичний зміст параметра n та теплової напруги V_T, зокрема чітко розрізнити позначення теплової напруги V_T і порогової напруги транзистора V_t. Це полегшило б сприйняття наведеного співвідношення для підпорогового струму.

2. До розділу 2. В описі портів 8T-комірки після рис. 2.1 (с. 52–53) варто уточнити термін «бітова лінія (рядок)», використаний для сигналів XA та XB, позначивши їх як лінії вибору рядка відповідно портів читання та запису (word-lines). Це узгодило б пояснення схеми з термінологією, використаною далі під час опису формування матриці пам’яті.

3. До розділу 3. У табл. 3.1 (с. 105) час доступу наведено за різних PVT-умов при ненавантаженому виході та тривалостях фронтів 0,1 нс, а на с. 106 показано його зростання при навантаженні 0,5 пФ. З огляду на використання часових LIB-таблиць 5×5 доцільно було б для одного з макросів навести кілька додаткових контрольних значень часу доступу за інших тривалостей фронтів і проміжних ємностей навантаження, за фіксованих PVT-умов. Це наочніше показало б вплив обох параметрів на швидкодію пам'яті.

4. До розділу 4. Для повноти представлення результатів доцільно було б навести короткий приклад функціонального моделювання Verilog-опису пам'яті, згаданого серед вихідних форматів компілятора (с. 122). Стислий опис тестового оточення (testbench) й одна часова діаграма операцій запису та читання зробили б цей аспект роботи генератора наочнішим.

Зауваження до першого, другого та четвертого розділів стосуються повноти й наочності викладу. Змістовне зауваження до третього розділу спрямоване на повніше представлення залежності часу доступу від тривалості вхідних фронтів і ємності навантаження. Висловлені зауваження не знижують наукової та практичної цінності дисертації й не впливають на загальний позитивний висновок.

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 автоматизованого проєктування енергоефективної двопортової пам'яті. Одержані результати мають наукову новизну та практичне значення.

За актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю основних положень, практичною цінністю та 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 автор дисертації, Груданов Олександр Миколайович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Офіційний опонент
доцент кафедри системного проєктування
Навчально-наукового інституту прикладного системного аналізу
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Валерій СТІКАНОВ

Підпис гр. _____
ЗАСВІДЧУЮ
Відділ кадрів та діловодства
_____ (_____)
підпис пр-ще

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Відділ кадрів і архівної справи № 6