ВІДГУК

офіційного опонента
старшого наукового співробітника кафедри
інформаційно-комунікаційних технологій
ім. О. О. Зеленського
доктора технічних наук, старшого дослідника
Кривенка Сергія Станіславовича
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

Дисертаційну роботу присвячено розробленню методів автоматизованого проєктування енергоефективної двопортової пам'яті регістрового типу RFSRAM для телекомунікаційних систем. Вбудовані блоки пам'яті забезпечують зберігання операндів і проміжних результатів оброблення сигналів у системах на кристалі, тому їхні енергетичні та часові характеристики мають безпосереднє значення для функціонування відповідного обладнання. Для застосувань з обмеженим енергоресурсом особливо актуальним є зниження енергоспоживання за умови збереження працездатності та необхідної швидкодії пам'яті.

Зменшення напруги живлення загострює питання статичної стійкості комірки, впливу технологічних варіацій і паразитних параметрів топології. Відповідно, актуальним є поєднання обґрунтованого вибору геометричних параметрів транзисторів, статистичного аналізу, автоматизованої генерації макросів і післятопологічної перевірки. Саме таку взаємопов'язану задачу розглянуто в дисертації О. М. Груданова. Тематика роботи відповідає потребам проєктування компонентів телекомунікаційних та радіотехнічних систем і є актуальною в науковому та прикладному аспектах.

2 Зв’язок роботи з науковими програмами, планами та темами

Тематика дисертації пов’язана з пріоритетними напрямами розвитку науки і техніки України, зокрема дослідженнями у сфері електроніки, мікроелектроніки та інформаційно-комунікаційних технологій. У вступі (с. 18–19) наведено її відповідність Законам України № 2623-III та № 848-VIII, а також напрямам європейської ініціативи EU Chips Act, визначеної Регламентом (ЄС) 2023/1781. Номерів державної реєстрації окремих науково-дослідних робіт, у межах яких виконано дисертацію, в поданому рукописі не зазначено.

3 Обґрунтованість та достовірність наукових результатів

Обґрунтованість основних положень роботи забезпечується поєднанням аналізу схемотехнічних рішень, моделей розузгодження параметрів MOS-транзисторів, SPICE-моделювання, статистичного опрацювання експериментальних даних та перевірки виготовлених тестових структур. Вибір параметрів 8T-комірки пов’язано з аналізом передавальних характеристик інверторів і граничного стану статичної стійкості, а оцінювання характеристик макросів доповнено врахуванням паразитних опорів і ємностей міжз’єднань.

Позитивної оцінки заслуговує проведення досліджень на різних рівнях: від окремої комірки та її статистичних характеристик до параметризованого макросу, його програмної генерації й експериментальної перевірки у кремнії. У дисертації відзначено обмеженість статистичних вибірок для аналізу крайових областей розподілу SNM (с. 87) та прямо зазначено спрощений характер інженерної оцінки сумарного розкиду параметрів (с. 89–90). Ці застереження дають змогу належним чином визначити межі застосування результатів. Питання інтерпретації відмінностей між окремими вибірками наведено нижче серед зауважень.

Постановка задач, застосовані методи та послідовність перевірки результатів свідчать про належне володіння здобувачем методологією

наукового дослідження у сфері проєктування інтегральних компонентів телекомунікаційних систем.

4 Наукова новизна одержаних результатів

Наукову новизну дисертації визначає розвиток методів проєктування двопортової RFSRAM-пам'яті, які пов'язують вибір параметрів комірки зі статистичними та післятопологічними характеристиками згенерованого макросу. До основних наукових результатів роботи належать такі положення.

Запропоновано SNM-орієнтований підхід до вибору геометричних параметрів транзисторів 8T-комірки двопортової RFSRAM. Його особливістю є поєднання критерію граничної стійкості за butterfly-кривими, оцінювання критичної напруги живлення та врахування розкиду порогових напруг транзисторів.

Для досліджуваних тестових 8T-комірок експериментально обґрунтовано доцільність статистичного оцінювання SNM із використанням моделей розузгодження параметрів транзисторів. Наведені розподіли, їхні числові характеристики та порівняння з розрахунковою оцінкою доповнюють номінальний схемотехнічний аналіз і дають підстави для інженерного використання такого підходу в межах прийнятих припущень.

Удосконалено метод оцінювання мінімальної робочої напруги пам'яті завдяки врахуванню статистичного розкиду параметрів транзисторів. Це дає змогу пов'язати вибір напруги з умовами збереження статичної стійкості, а не обмежуватися аналізом номінального значення SNM.

Розроблено параметризовану архітектуру компілятора двопортової RFSRAM типу 1R1W та алгоритмічне забезпечення узгодженого формування матриці комірок, периферійних блоків, схемного нетліста і бібліотечних описів часових та енергетичних характеристик.

Набули подальшого розвитку методи післятопологічної верифікації RFSRAM через інтеграцію методів екстракції паразитних RC-параметрів, розроблених у співавторстві, формування компактного нетліста та SPICE-

моделювання. Їх застосування дає змогу уточнювати характеристики макросу після формування його топології.

У сукупності ці результати забезпечують послідовний перехід від вибору параметрів комірки до автоматизованого проєктування та перевірки макросу пам'яті й відповідають меті дисертаційної роботи.

5 Структура та зміст дисертації

Дисертація викладена на 182 сторінках і містить анотації, вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел та два додатки. Структура роботи відображає послідовність розв'язання поставлених задач: аналіз проблеми, розроблення методів оцінювання комірки, реалізацію компілятора та перевірку згенерованих макросів.

У першому розділі систематизовано методи зниження енергоспоживання SRAM/RFSRAM, розглянуто їхні обмеження за стабільністю, площею та швидкодією. Проаналізовано вплив технологічного масштабування, статистичних варіацій параметрів транзисторів і паразитних RC-параметрів. На цій основі обґрунтовано напрям подальшого дослідження.

Другий розділ присвячено вибору параметрів 8T-комірки з окремими портами читання і запису, оцінюванню SNM та WNM і визначенню умов стійкості при зниженні напруги живлення. Методичні положення проілюстровано схемотехнічним моделюванням для планарних CMOS-технологій. Експериментальний аналіз розподілу SNM виконано на тестових комірках 250-нм технології; наведено результати для двох орієнтацій комірки та зіставлення з розрахунковою оцінкою розкиду.

У третьому розділі розроблено архітектуру та алгоритмічне забезпечення компілятора RFSRAM, описано формування топології, схемного нетліста і бібліотечних LIB-файлів. Програмна реалізація поєднує керування генерацією мовою Lua з ядром роботи з топологічною базою даних мовою C++. Застосування маршруту продемонстровано, зокрема, на

макросах RF1 20×42 та RF2 56×24. Розглянуто оцінювання часу доступу і середнього динамічного струму за внесками функціональних блоків.

У четвертому розділі наведено результати перевірки виготовлених у кремнії регістрових файлів конфігурацій 256×72, 84×24 та 136×39, досліджено вплив тестового тракту на частотну характеризацію й реалізовано вбудоване самотестування BIST. Окремо виконано післятопологічне моделювання макросу RF2 56×24 із порівнянням моделей без паразитних параметрів та з урахуванням опорів, ємностей і їх сукупного впливу. Наведені абсолютні значення часу доступу підтверджують необхідність урахування паразитних параметрів у маршруті проєктування.

Загальні висновки відображають результати виконання основних задач дослідження. Додатки містять фрагменти програмного коду генерації бібліотечних файлів і акт впровадження результатів дисертаційної роботи.

6 Теоретичне та практичне значення результатів

Теоретичне значення роботи полягає у розвитку методичних засад вибору параметрів двопортової RFSRAM-пам'яті з урахуванням взаємозв'язку між геометрією транзисторів, їхнім статистичним розузгодженням, статичною стійкістю комірки та допустимою напругою живлення. Поєднання цих положень із післятопологічним аналізом розширює можливості оцінювання часових та енергетичних характеристик згенерованих макросів.

Практичну цінність має реалізація параметризованого компілятора, який забезпечує узгоджене формування топологічного, схемного та бібліотечного представлень пам'яті. Це створює основу для повторного використання розроблених рішень під час підготовки макросів різної конфігурації. Інтеграція BIST і врахування впливу тестового оточення підвищують інформативність експериментальної перевірки.

Використання результатів у науково-дослідній та інженерно-проєктній діяльності ТОВ «СІЛВАКО ЮКРЕЙН» підтверджено наведеним у Додатку Б

актом впровадження № 150626/1 від 15 червня 2026 року. Перенесення запропонованих рішень на інші технологічні процеси передбачає відповідну адаптацію та перевірку, що узгоджується з викладеними в роботі межами їх застосування.

.7 Повнота оприлюднення результатів та особистий внесок здобувача

Основні результати дисертації висвітлено у восьми наукових працях: чотирьох статтях у наукових журналах, одній статті в матеріалах міжнародної конференції IEEE ELNANO та трьох публікаціях матеріалів доповідей на наукових конференціях. Чотири праці виконано одноосібно. Тематика наведених публікацій охоплює стабільність комірки пам'яті, екстракцію паразитних параметрів, оцінювання енергоспоживання, самотестування та частотну характеризацію регістрових файлів і відповідає основним напрямам дисертації.

Апробацію результатів здійснено на конференціях «ПОЛІТ. Сучасні проблеми науки», «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси», «ABIA-2025» та IEEE ELNANO-2026. У дисертації наведено особистий внесок здобувача в розроблення методики, проведення моделювання, програмну реалізацію, аналіз та інтерпретацію результатів. Внесок у праці, опубліковані у співавторстві, подано узагальнено (с. 26), без розмежування за кожною публікацією. Використання відомих наукових положень супроводжується посиланнями на відповідні джерела.

8 Мова та оформлення дисертації

Роботу викладено українською мовою з використанням прийнятої в галузі термінології. Матеріал організовано послідовно та доповнено схемами, графіками, таблицями й прикладами програмної реалізації, які дають змогу простежити зміст запропонованих рішень. Структура та виклад роботи в цілому забезпечують сприйняття її основних положень. Окремі уточнення щодо наочності й однозначності представлення матеріалу наведено в зауваженнях.

9 Дотримання академічної доброчесності

На титульній сторінці наведено заяву здобувача про власні результати й посилання на джерела. За офіційним звітом StrikePlagiarism від 16.09.2026 (ID 334973250) оригінальність тексту становить 98,29 %, подібність — 0,81 %, самоцитування — 0,23 %. Науково-технічна бібліотека КАІ у висновку зазначила, що виявлені збіги пов'язані з усталеними термінами, цитатами та фаховими джерелами, не стосуються положень наукової новизни й авторських результатів, тому роботу можна прийняти до розгляду спеціалізованою вченою радою.

10 Зауваження та дискусійні положення

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

1. До розділу 1. У підрозділі 1.3 (с. 33–41) проведено змістовний аналіз методів зниження енергоспоживання SRAM/RFSRAM. Водночас наведені переваги та обмеження доцільно було б додатково узагальнити в компактній порівняльній таблиці за впливом на енергоспоживання, стабільність комірки, площу та швидкодію. Це полегшило б сприйняття огляду та зіставлення розглянутих підходів.

2. До розділу 2. У підрозділах 2.9.4–2.9.5 (с. 84–90) наведено експериментальні значення стандартного відхилення SNM для чотирьох вибірок і спрощену розрахункову оцінку $\sigma = 0{,}0204$ В. Зіставлення з моделлю виконано для вибірки DP_SNM_SN0a ($\sigma = 0{,}0181$ В), тоді як для SN1a значення σ становить 0,0141 В і відрізняється від розрахункового приблизно на 31 %. Доцільно було б пояснити, чому для зіставлення обрано саме SN0a, та уточнити інтерпретацію результатів для двох орієнтацій комірки з урахуванням зазначеного в роботі спрощеного характеру аналітичної оцінки. Це дозволило б чіткіше окреслити межі її застосовності.

3. До розділу 3. У підрозділі 3.1 доцільно узгодити позначення ширини адресних шин і шин даних у тексті (с. 93–94) з параметричними позначеннями на рис. 3.1 (с. 92), а фіксовані індекси [7:0] та [39:0] явно віднести до конкретного прикладу конфігурації макросу. Це зробило б опис інтерфейсу компілятора однозначнішим.

4. До розділу 4. У табл. 4.3 (с. 159) окремі значення відносної зміни часу доступу ΔTacc потребують звірки з формулою (4.6) (с. 160). Зокрема, для кута SS, 1,1 В, 85 °C значення часу доступу 3,83 та 6,92 нс відповідають приросту приблизно 80,7 %, тоді як у таблиці наведено 44,5 %. Таке арифметичне уточнення необхідне для коректного відображення кількісних результатів, але не змінює загального висновку про суттєвий вплив паразитних RC-параметрів на швидкодію пам'яті.

Наведені зауваження мають конструктивний характер. Основне зауваження до розділу 2 стосується інтерпретації експериментальних вибірок і меж застосування спрощеної статистичної оцінки; зауваження до розділів 1, 3 і 4 спрямовані на поліпшення представлення матеріалу та уточнення окремих числових даних. Вони не заперечують основних наукових результатів, не знижують загальної позитивної оцінки дисертації та не змінюють висновку щодо її наукової і практичної цінності.

11 Загальний висновок

Дисертаційна робота Груданова Олександра Миколайовича «Методи проєктування енергоефективної двопортової RFSRAM-пам'яті для телекомунікаційних систем» є завершеною кваліфікаційною науковою працею, в якій розв'язано науково-технічну задачу розроблення та верифікації методів автоматизованого проєктування двопортової пам'яті з пріоритетом низького енергоспоживання, урахуванням статичної стійкості комірки, статистичних варіацій і паразитних параметрів топології. Одержані результати мають наукову новизну, теоретичне та практичне значення.

За актуальністю, науковим рівнем, обґрунтованістю основних положень, практичною цінністю та повнотою оприлюднення результатів дисертація відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про 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. Її автор, Груданов Олександр Миколайович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Офіційний опонент
доктор технічних наук, старший дослідник,
старший науковий співробітник кафедри
інформаційно-комунікаційних технологій
ім. О. О. Зеленського
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»

Сергій КРИВЕНКО

ПІДПИС Сергія Кривенка
ЗАСВІДЧУЮ
Учений секретар університету