

**Голові спеціалізованої вченої ради  
ДФ 20.051.105  
Прикарпатського національного  
імені Василя Стефаника  
доктору фізико-математичних наук,  
професору Ільницькому Роману  
Васильовичу  
(76018, м. Івано-Франківськ,  
вул. Шевченка, 57)**

## **ВІДГУК**

кандидата фізико-математичних наук, доцента кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету "Львівська політехніка"

**Лях-Кагуй Наталії Степанівни.**

на дисертаційну роботу **Бенька Тараса  
Григоровича**

**«Інтегральні перетворювачі сигналів для сенсорних мікросистем-на-кристалі зі структурами кремній-на-ізоляторі»**, подану на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 171 Електроніка

### **Актуальність теми**

Важливим та актуальним напрямом сучасної електроніки та мікроелектроніки є створення мікросистем-на кристалі, зокрема сенсорного типу та їх різновиду мікро лабораторій-на-кристалі. Елементною базою цих пристроїв є інтегральні перетворювачі сигналів (ІПС), які можуть виконувати функції як первинного перетворення інформації так і її цифрової обробки. Тому дослідження у цьому напрямку є актуальними тому, оскільки приведуть до розширення інтегральної елементної бази основі як комплементар метал-оксид-напівпровідник (КМОП) -технологій, які є стандартом для виготовлення інтегральних схем, так і розширення цієї бази на основі більш перспективної кремній-на-ізоляторі КМОП-технологій, з покращеними електронними параметрами та можливостями конструювання нових приладних структур сенсорного типу, та схем обробки інформації за єдиним технологічним циклом виготовлення. Важливими є проведення досліджень безпосередньо на кристалі, при створенні нових інтегральних пристроїв, проведенні їх самотестування, технології виготовлення, оскільки мікросистеми на кристалі сенсорного типу можуть виконувати важливу роль і бути перспективними у цьому напрямку.

Часто при створення нових інтегральних технологій є необхідність дослідження властивостей напр., некремнієвих елементів, які можуть бути вбудованими у сенсорні мікросистеми на кристалі, як первинні сенсорні

елементи, тому у цьому напрямку ІПС, особливо з перспективним технологіями, типу кремній-на-ізоляторі (КНІ) є вкрай необхідними і актуальними.

Перспективним є напрям біомедичних, та інших досліджень з мікро- і нанооб'єктами. Вітчизняні дослідження стосовно ІПС, особливо зі структурами КНІ для сенсорних мікросистем-на-кристалі проводяться в недостатньому обсязі.

Важливим завданням є також створення мікросистем на кристалі у стислі терміни, тому ідея використання для цієї мети базових матричних кристалів проведення досліджень для створення ІПС на основі базових матричних комірок теж заслуговує окремої уваги.

Тому дисертаційна робота Бенька Т.Г. є актуальною та своєчасною. І може мати науково прикладне значення і присвяченна розробці та дослідженню нових ІПС.

#### Наукова новизна

В дисертації Бенька Т.Г. основну увагу зосереджено на проведенні комплексних досліджень зі створення схемо топологічних рішень та дослідження властивостей ІПС на основі як КМОН-структур, які є основою сучасних інтегральних схем, так на основі більш перспективних КНІ КМОН-структур, спрямованих на розв'язання науково-прикладних задач зі створення на їх основі елементної бази для проектування мікросистем-на-кристалі сенсорного типу. що може бути використано у створенні реальних мікросистем-на-кристалі. Отримано наступні основні результати:

Вперше розроблено і промодельовано уніфікований ІПС на основі кільцевого генератора, в коло зворотнього зв'язку якого можна включати чутливі елементи, ємнісного, резистивного, КМОН-транзисторного типів, світлочутливі елементи, відкликом на зміну їх електрофізичних властивостей є зміна частоти кільцевого генератора, що є зручним для реєстрації та подальшої обробки в мікросистемі.

Проаналізовано і показано моделюванням з використанням систем автоматизованого проектування (САПР) MicroWind перспективність створення ІПС на основі КМОН КНІ-структур порівняно із КМОН-технологією.

Встановлено, що в залежності магнітоопору КНІ-резисторних структур від поля при температурі 4,2 К в діапазоні магнітних полів від 0,2 до 14 Тл спостерігається лінійна поведінка магнітоопору, яка спричинена зростанням електронної провідності. Ця особливість є цінною для створення сенсорних елементів для вимірювання сильних магнітних полів за низьких температур і створення первинних ІПС в сенсорних мікросистемах.

Основне практично-прикладне значення результатів дисертації полягає в тому, що вона має чітку прикладну спрямованість, і на основі проведених

досліджень - запропоновано й розроблено ІПС на основі інтегральних інверторів, які чутливі до змін надмалих ємностей на рівні 0.1 пФ в колі вхідних затворів, які також можуть фіксувати зміни резисторів та індуктивностей.

Запропоновано і досліджено ІПС, на основі КМОН- інверторних схем з додатковими транзисторами, що забезпечує в середньому на 60% менше споживання енергії в режимі перехідних процесів, що є перспективним для підвищення інтеграції елементів на кристалі;

Набула подальшого розвитку комірка КМОН БМК на основі КНІ – структур, як елемент для конструювання ІПС в короткі терміни. Особливістю цього типу комірки є введення додаткового контакту для подачі зміщення у підканальну область КНІ МОН-транзисторів, що добре усуває так званий «кінк-ефект», і така комірка водночас є зручною для топологічного трасування.

Розроблено і досліджено схемотопологічне рішення базового інтегрального елемента операційного підсилювача, що може послужити основою для створення ІПС, розширення номенклатури ІПС на його основі, КНІ КМОН перетворювачі рівнів сигналів з низького на високий та високого на низький, які необхідні для зовнішнього та внутрішнього інтерфейсу мікросистеми-на-кристалі із комп'ютеризованими пристроями.

Значна частина експериментальних результатів може послужити основою для подальшого розвитку напрямку сенсорних мікросистем-на-кристалі, а саме для побудови ІПС, працездатних в широких діапазонах температур, сильних магнітних полів, для фіксації змін надмалих ємностей на рівні 0,1 пФ та ін.

**Достовірність та обґрунтованість результатів, отриманих дисертантом** можна підтвердити використанням системного підходу, що ґрунтується на основі теорії МОН - приладних структур, їх фізичних моделей. Розробка і моделювання технологічних процесів і режимів формування приладних структур здійснювали у САПР TCAD. У цій ж системі проводилось приладно-технологічне моделювання і екстракція електричних характеристик приладних КНІ- структур, моделюванням досліджувались в них розподіли електричних полів і напруженостей в залежності від зовнішніх впливів. Для розробки інтегральних схемотехнічних рішень і топологій елементів інтегральних перетворювачів були використані сучасні інтерактивні системи проектування LT SPICE , Tanner Pro, MicroWind

Моделювання й параметрична оптимізація ІПС безпосередньо із топології, відпрацювання конструктивно-технологічних обмежень топологічного проектування, врахування паразитних зв'язків, перетинів структур і їх параметрів, дослідження електричних, частотних й температурних характеристик здійснювались у системах TopSpice, MicroWind.

Результати дисертації були апробовані на провідних конференціях, опубліковані у відомих виданнях в тому числі у наукометричних базах SCOPUS

і WoS, міжнародних конференціях, що індексуються у науко метричних базах SCOPUS і WoS, тому результати роботи можна вважати повністю обґрунтованими і достовірними, були отримані в результаті виконання держбюджетних тем.

### **Дані про відсутність текстових запозичень та порушення академічної доброчесності.**

Під час детального розгляду дисертації порушень академічної доброчесності та елементів фальсифікації не виявлено. Автор використовує посилання на свої наукові публікації, публікації інших авторів та джерел.

Однак, як і кожна наукова робота, розглянута дисертація не позбавлена **певних недоліків і рекомендацій**. Серед них відзначаю наступні:

1. У тексті дисертації мають місце окремі граматичні помилки, напр. стр 12., 14. (fundamental application, проектування).
2. В дисертаційній роботі, згадується про використання САПР MicroWind. Проте недостатньо вказано на його можливості схематологічного моделювання елементів ІПС безпосередньо із топологій, дослідження температурних характеристик.
3. Вважаю, що температурні характеристики ІПС могли би бути представлені ширше.
4. В дисертації подано результати дослідження ІПС на основі інверторів як ключових елементів, проте було б також доцільним дослідити такого типу елементи, які працюють в режимі максимального підсилення сигналів в околі точки квантування, що може бути предметом подальших досліджень дисертанта.
5. Представлять інтерес розширення різновидів ІПС на основі не тільки базових, а й високоточних операційних підсилювачів, а також КНІ КМОН-схем тригерного типу, що суттєво розширило б гамму ІПС.
6. Доцільно було б коротко навести результати технологічних моделювань створення базових КНІ КМОН-структур.

Однак вказані зауваження і недоліки суттєво не впливають на цінність дисертації в цілому. Дисертація складається з анотації, списку опублікованих праць за темою дисертації, змісту, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та додатків. Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Загальний обсяг дисертації складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 173 сторінки, містить 120 рисунків, 16 таблиць і 121 бібліографічне посилання. Результати дисертації опубліковані у 23 наукових працях, з них 3 статті – у виданнях, що індексуються в міжнародних

науко-метричних базах даних Scopus, 5 матеріали конференції у збірнику, які індексуються науково метричною базою Scopus; 15 тез міжнародних конференцій., що підтверджує повноту висвітлення результатів у наукових працях та особистий внесок здобувача.

Опубліковані праці дозволяють простежити шлях від постановки задач до алгоритму їх вирішення і отримання та пояснення результатів досліджень. Аналіз змісту дисертації та опублікованих автором робіт свідчить про те, що наукові положення, висновки і рекомендації опубліковані в повному об'ємі та обговорені на міжнародних і вітчизняних науково-практичних конференціях. Таким чином, робота, яка рецензується, достатньо повно проаналізована і позитивно оцінена рядом спеціалістів та науковців як в Україні так і за її межами.

### **Заключна оцінка дисертаційної роботи**

На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертація Бенька Т.Г. «Інтегральні перетворювачі сигналів для сенсорних мікросистем-на-кристалі зі структурами кремній-на-ізоляторі» є завершеною самостійною науково-дослідницькою працею, у якій вперше розв'язано актуальне наукове і науково-практичне завдання зі створення і дослідження властивостей інтегральних перетворювачів сигналів на основі КМОН і КНІ КМОН–структур, для мікросистемних використань сенсорного типу, включаючи схемо топологічні рішення на основі комірок БМК. За науково-прикладним рівнем виконання дисертації, актуальністю теми, обґрунтованістю і достовірністю наукових досліджень і висновків, науковою новизною, обсягом дисертація відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії КМУ» від 12.01.2022 №44 (зі змінами) та вимогами до оформлення дисертації, затвердженими наказом МОН України від 12.01.2017 №40 (зі змінами), а її автор **Бенько Тарас Григорович**, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 171 Електроніка.

Офіційний опонент:

кандидат фізико-математичних наук,  
доцент кафедри напівпровідникової  
електроніки Національного університету  
"Львівська політехніка"

Наталія Лях-Кагуй