

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету «Львівська політехніка»
доктору технічних наук, професору
Климашу М.М.

ВІДГУК

офіційного опонента

Політанського Руслана Леонідовича

на дисертаційну роботу Хільчука Миколи Олександровича на тему "Функціональне інтегрування в сигнальних перетворювачах фотовольтаїчних сенсорних пристроїв з оптичною телекомунікацією", яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» та спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

1. Актуальність теми дисертації

У сучасній сенсорній електроніці актуальним є завдання адаптації методів та засобів сигнального перетворення фотоелектронних сенсорів бездротових мереж WSN (бездротових сенсорних мереж) для їхнього подальшого розвитку в рамках концепцій Інтернету речей (IoT) та Індустріального Інтернету речей (IIoT). В інфокомунікаційних системах такі пристрої відомі як сенсорні вузли та описуються термінами "Розумних сенсорів" (Smart Sensor), "Розумного пилу" (Smart Dust) та "Лабораторії на чіпі" (Lab-on-Chip).

Комплексні сенсорні вузли з інтеграцією фотовольтаїчних сенсорних пристроїв, представляють значні перспективи в області сучасної технології. Ці системи відображають тенденцію до створення компактних та ефективних рішень, які можуть забезпечити необхідні функції в рамках обмежених розмірів і ресурсів. Інтеграція фотовольтаїчних сенсорних пристроїв у розумні сенсори на чіпі відкриває можливості для автономної роботи системи, використовуючи енергію від сонячних панелей для живлення та продовження функціонування без постійного джерела електроживлення.

Ця інтеграція також сприяє вдосконаленню систем у сфері Інтернету речей (IoT) та Індустріального Інтернету речей (IIoT), де розумні сенсори можуть взаємодіяти в реальному часі, забезпечуючи збір та обробку даних. Фотовольтаїчні сенсорні пристрої сприяють створенню стійких та ефективних систем збору інформації, що має велике значення для вирішення завдань у різних галузях, включаючи екологію, медицину, транспорт та багато інших. Такі інновації підсилюють потенціал для створення ефективних та енергоефективних систем, що відкривають нові горизонти в сучасній технологічній парадигмі.

З розвитком інформаційних технологій, особливо в контексті Інтернету речей (IoT), вимоги до сенсорної електроніки значно зростають. Сучасні сенсори характеризуються компактністю, здатністю працювати від малопотужних джерел живлення з обмеженим енергоспоживанням, а також програмованою реконфігурацією та багатофункціональністю.

Адаптація сигнальних перетворювачів для використання в системах на кристалі є актуальним завданням. Використання функціонального інтегрування кіл фотоперетворювачів у контексті злиття даних є актуальним методом модифікації сигнальних перетворювачів. Для оптичних сигналів та інформативних сигналів у сенсорній електроніці необхідні відповідні динамічні характеристики, селективність, завадостійкість, лінійність функції перетворення та інші параметри. Розробка фотовольтаїчних сенсорних пристроїв для бездротових мереж також пов'язана з вирішенням проблем енергоефективності фотовольтаїчного живлення. Ефективний відбір та перетворення енергії фотовольтаїчного джерела живлення, а також оптимальне використання цієї енергії у процесі формування та перетворення інформативних сигналів сенсорного пристрою є важливим завданням.

Актуальним завданням є створення нової моделі фотоелектронної сенсорики на базі систем на кристалі, яка відрізнятиметься від наявних інтегрованістю функцій вимірювального сигнального перетворення, фотовольтаїчного живлення та телекомунікацією. Фотовольтаїчні сенсорні пристрої в концепції Інтернету речей потребують розширення функціональності та підвищення ефективності їх роботи за допомогою оптичної телекомунікації. Це передбачає структурно-схемний синтез та параметричний аналіз базових вузлів фронт-енду змішаного сигнального перетворення. Сенсорні пристрої повинні відповідати вимогам сумісності з фотовольтаїчними колами живлення та управління, мати низьке енергоспоживання, програмоване конфігурування та керування, мультифункціональність, а також бути сумісними зі структурами систем на кристалі.

2. Загальна характеристика роботи

Дисертаційна робота Хільчука М.О. стосується розв'язання наукового завдання - розширення функціональності та підвищення ефективності сигнального перетворення у фотоелектронних сенсорних пристроях з оптичною телекомунікацією.

Робота складається з переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і 3 додатків. Загальний обсяг роботи складає 202 сторінки друкарського тексту, із них 7 сторінок вступу, 139 сторінок основного тексту, 136 - рисунків, список використаних джерел із 182 найменувань

У **вступі** наведено загальну характеристику дисертаційної роботи, обґрунтована актуальність обраної теми, сформульовано мету дослідження та визначено завдання для її досягнення. Також вказано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Надана інформація про впровадження результатів роботи, їх апробацію, публікації та особистий внесок здобувача.

В **першому розділі** проведено аналіз тенденції розвитку методів та засобів сигнального перетворення у фотоелектронних сенсорних пристроях бездротових мереж WSN в концепції Інтернету Речей. У сфері інфокомунікаційних систем використовують термін "сенсорні вузли" або "Sensor Node", які охоплюють концепцію "Розумних сенсорів" або "Smart Sensors" з електронною комунікацією, основою на безпроводних оптичних технологіях. Приводяться приклади застосування "Розумних сенсорів" у поєднанні з безпроводним оптичним зв'язком. Вказується, що завдання покращення параметрів сигнальних перетворювачів фотовольтаїчних сенсорних пристроїв із оптичною телекомунікацією виникає через невідповідність вимогам до фотоперетворювачів фотовольтаїчних кіл живлення та оптичних перетворювачів формування інформативних сигналів.

Уточнюється проблематика наукових досліджень та тенденції розвитку у сфері фотоелектронних сенсорів, подаються характерні приклади сучасних рішень на основі інтегрованих вузлів. Проводиться аналіз тематик в контексті концепції злиття даних, зокрема його реалізації в сенсорних мережах за допомогою наукових публікацій.

Виділяється основний недолік в процесах сигнального перетворення фотоелектронних сенсорів, яким є великий паразитний вплив стороннього, неінформативного оптичного випромінювання та електромагнітних завад. Зазначається, що інтенсивність випромінювання таких джерел перевищує корисну складову зміни оптичного сигналу, внесена активним середовищем, що несе інформацію про хімічні чи біохімічні речовини, у сотні чи тисячі разів.

У **другому розділі** дисертації сформовано принцип функціонального інтегрування в фотоелектронних сенсорах, де була проведена оптимізація режимів фотовольтаїчного живлення та режимів живлення сигнальних перетворювачів. Також були розроблені SPICE-моделі ефективності перетворення енергії фотовольтаїчного джерела живлення, первинного перетворювача фотодіодного типу та компонентів сигнального тракту. Сформульовано принцип функціонального інтегрування LCPS (Light Communication & Powering & Sensing), що об'єднує сигнальні перетворювачі фотосенсорики, фотовольтаїчне живлення та оптичний зв'язок.

Подано розвиток методу трекінгу точки максимальної енергії MPPT (Maximum Power Point Tracking) та проведено аналіз втрат перетворення потужності фотовольтаїчного джерела живлення на робочу точку оптимального

відбору енергії. Проведений аналіз дає можливість підвищити ефективність фотовольтаїчного живлення з урахуванням втрат в DC-DC конвертерах понижувального чи підвищувального типів.

У **третьому розділі** виконано поставлене завдання адаптації сигнального перетворення у фотоелектронних сенсорних пристроях з оптичною телекомунікацією. Проведено параметричний аналіз перетворювачів, зокрема трансїмпедансних підсилювачів та гіраторів. Надано порівняльний аналіз перехідних процесів в схемах підсилення та інтеграції сигналу. Розроблено алгоритмічно-схемне рішення селектора керуючих імпульсів в колі фотовольтаїчного живлення.

Запропоновано подальший розвиток сигнальних перетворювачів фотоелектронних сенсорних пристроїв, який включає поєднання функцій трансїмпедансного підсилення та програмно-керованого сигнального інтегрування. Запропоноване рішення вирішує завдання підвищення швидкодії та точності процесу вимірювання. Розроблене рішення відповідає концепції злиття даних і базується на формуванні масиву результатів вимірювального перетворення при перемиканні режимів роботи РТІС з інверсією напруги на інтегруючому конденсаторі.

У **четвертому розділі** роботи виконано верифікацію запропонованих рішень та апробацію її результатів. Створено макет реконфігурованої та програмно керованої платформи прототипування сигнальних перетворювачів LCPS. Розроблено та протестовано сигнальний перетворювач PIT (Programmable Impedance Transducer), який синтезує програмовані вузькосмуговий NBT (Narrow Band Transducer) та широкосмуговий WBT (Wide Band Transducer) сигнальні тракти трансїмпедансного типу. Вузькосмугові тракти забезпечують частотну селективність інформативного сигналу та високу завадостійкість, тоді як широкосмугові тракти забезпечують лінійність перетворення в широкій смузі частот, вирішуючи завдання дослідження спектральних характеристик речовин, калібрування сенсорів та інтегрування інтелектуальних функцій самодіагностики.

Також розроблено та випробувано фронт-енд (Front-end) змішаного сигнального перетворення РТІС (Programmable Trans-Impedance Convertor), що об'єднує функції трансїмпедансного підсилення та програмно керованого інтегрування. Відповідно до концепції злиття даних (Data Fusion) забезпечується формування масиву результатів вимірювального перетворення при перемиканні режимів роботи РТІС з інверсією напруги на інтегруючому конденсаторі. Використовуючи цей масив та відповідні алгоритми корекції паразитних дрейфів схеми інтегрування, можна відділити корисну та паразитну складові сигналу.

Висновки до дисертації включають узагальнені результати дослідження та рекомендації щодо їх практичного застосування

В додатку до роботи подано акт впровадження її результатів.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, наданих в дисертації, їхня достовірність

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Хільчука Миколи Олександровича підтверджується коректним використанням теоретичних та експериментальних методів досліджень, зокрема методів математичного моделювання, методів SPICE моделювання а також актом впровадження результатів дисертаційних досліджень.

4. Достовірність і новизна наукових положень, висновків і рекомендацій.

У ході розв'язання поставленої наукової задачі здобувачем отримані наступні основні наукові результати:

1. Сформульовано принцип функціонального інтегрування LCPS (Light Communication & Powering & Sensing), що поєднує сигнальні перетворювачі фотосенсорики, фотовольтаїчного живлення та оптичного безпроводного зв'язку. Вирішено завдання з розроблення, параметричного аналізу та модифікування базових вузлів фронт-енду змішаного сигнального перетворення (Mixed Signal Fron-end) LCPS пристроїв. Створено макет LCPS пристрою.
2. В розвиток методу трекінгу точки максимальної енергії MPPT проведено аналіз втрат перетворення потужності фотовольтаїчного джерела живлення на робочу точку оптимального відбору енергії.
3. Розроблено імітаційні SPICE моделі перетворення енергії фотовольтаїчного джерела та первинного перетворювача фотодіодного типу.
4. З метою подальшого розвитку сигнальних перетворювачів фотоелектронних сенсорних пристроях з оптичною телекомунікацією проведено параметричний аналіз їх базових вузлів трансїмпедансних підсилювачів, гіраторів та інтеграторів. Показано, що основним недоліком сигнального перетворення фотоелектронних сенсорних пристроїв є значний паразитний вплив стороннього (неінформативного) оптичного випромінювання та електромагнітних завад. Вирішення вищезгаданого завдання з покращення частотної селекції передбачає використання перетворювачів на основі гіраторів – схем конверсії реактивного імпедансу, що синтезують реактивне навантаження індуктивного типу з використанням ємнісних компонентів.
5. З метою розширення функціональності фотоелектронних сенсорних пристроїв розроблено та апробовано сигнальний перетворювач PИТ (Programmable Impedance Transducer), в якому синтезуються

програмовані вузькосмуговий NBT (Narrow Band Transducer) та широкосмуговий WBT (Wide Band Transducer) сигнальні тракти трансїмпедансного типу.

6. Розроблено та протестовано фронт-енд змішаного сигнального перетворення РТІС (Programmable Trans-Impedance Converter), який комбінує можливості трансїмпедансного перетворення та програмно керованого інтегрування.

5. Практична значимість результатів роботи

Отримані в дисертаційній роботі наукові результати мають практичну цінність. Запропонований принцип функціонального інтегрування LCPS дозволяє створити фотовольтаїчні сенсорні пристрої, які у свою чергу можуть використовуватися в розумних пристроях, підключених до Інтернету, для збору і передачі даних.

Зокрема :

- Поєднання сигнальних перетворювачів фотосенсоріки, фотовольтаїчного живлення та оптичного зв'язку дозволяє створити фотовольтаїчні сенсори які можуть використовуватися для живлення датчиків та пристроїв, що вимагають невеликої потужності. Їх сонячні елементи можуть конвертувати сонячне випромінювання в електроенергію, що дозволяє їм працювати автономно або значно продовжувати термін служби батарей. Загалом, запропонований принцип функціонального інтегрування фотовольтаїчних сенсорних пристроїв в "системи на чіпі" має великий потенціал для оптимізації енергоспоживання та забезпечення стабільної роботи в різноманітних умовах.

- Реалізація розробленого та протестованого фронт-енду змішаного сигнального перетворення РТІС (Programmable Trans-Impedance Converter) дала змогу підвищити точність аналого-цифрового перетворення для кондиціонування сигналу до 17% в залежності від смуги частот одиничного підсилення.

6. Повнота викладу наукових положень, висновків, рекомендацій в опублікованих працях

За результатами досліджень, у 10 наукових публікаціях повністю відображені основні результати дисертації, з них 5 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у науковому періодичному виданні інших держав, що входять до наукометричних баз Scopus/Web of Science, 2 у збірниках матеріалів доповідей всеукраїнських конференцій, 2 у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій індексованих у наукометричній базі Scopus та Web of Science.

7. Відповідність теми дисертації профілю спеціальності

Дисертація Хільчука М.О. повністю відповідає стандарту спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

8. Відсутність порушення академічної доброчесності.

Підстав для сумнівів у науковій доброчесності здобувача під час детального ознайомлення з дисертаційною роботою не виявлено. Узгодженість тексту дисертації з науковими працями дисертанта свідчить про відсутність ознак фальсифікації. Проведений аналіз основних ідей та методів дотичних до тематики інших робіт містить відповідні посилання.

9. Зауваження до дисертаційної роботи

1. В четвертому пункті наукової новизни стверджується, що «Вперше розроблено метод сигнального перетворення у відповідності з концепцією злиття даних (Data Fusion), який поєднує функції трансїмпедансного підсилення та програмно керованого інтегрування з модуляцією вихідної напруги у всьому діапазоні напруг джерела живлення, що забезпечується підвищенням роздільної здатності та точності вимірювального перетворення». Однак, по-перше, в роботі недостатньо приділено уваги концепції злиття даних, не є очевидним яким чином отримані результати відповідають цій концепції. І по-друге, більш коректно стверджувати, що набув подальшого розвитку метод змішаного сигнального перетворення (Mixed Signal), новизною якого є поєднання трансїмпедансного підсилення та програмно керованого інтегрування з модуляцією вихідної напруги у всьому діапазоні напруг джерела живлення.

2. Термін «SRN - Maximum Negative Slew Rate» некоректно переведено на українську мову «максимальна негативна швидкість наростання» (рис. 22). В даному контексті мова не йде про «негативну швидкість», а про «швидкість наростання від'ємної (негативної) напруги».

3. Для реалізації макету для прототипування фотоелектронних сенсорних пристроїв (стор. 139 – 141, рис. 4.1, рис. 4.2) автор використовує модуль на основі системи на кристалі п'ятого покоління PSoC 5LP. Проте, вже понад п'ять років доступним є наступне шосте покоління цих систем PSoC 6, які спеціально розроблені для реалізації безпроводного зв'язку та містять два мікропроцесори. Відтак, виникає питання актуальності створеного макету прототипування.

4. Відсутня інформація щодо вказаної в дисертації проблеми «Rail-to-Rail функціонування» (стор. 2, 7, 27 тощо). В чому полягає ця проблема і чому її необхідно вирішувати?

5. Не коректною чи не завершеною є фраза – «Інтегральний сигнальний AS5911 CT Detector Interface AMS-OSRAM» (рис. 1.7).

6. Зустрічаються недоліки форматування тексту дисертаційної роботи.

Зазначені недоліки не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

10. Відповідність дисертації встановленим вимогам

Анотація дисертації повністю розкриває зміст дослідження, яке відповідає всім вимогам для отримання наукового ступеня доктора філософії. Робота є завершеною, високоякісно виконаною та оформленою. Стиль подання матеріалів досліджень, наукових тверджень, висновків і рекомендацій спрямований на максимальну доступність для якісного сприйняття.

11. Загальні висновки

1. На підставі розгляду змісту дисертації, праць здобувача, акту впровадження, аналізу ступеня новизни наукових положень та практичної значимості отриманих у роботі результатів, висновків та рекомендацій можна зробити висновок, що дисертаційна робота Хільчука Миколи Олександровича «Функціональне інтегрування в сигнальних перетворювачах фотовольтаїчних сенсорних пристроїв з оптичною телекомунікацією» є завершеною науковою працею, в якій отримані нові наукові результати, які забезпечили розв'язання поставленого в дисертації актуального наукового завдання в галузі телекомунікацій та радіотехніки.

2. Дисертаційна робота за змістом та оформленням відповідає встановленим вимогам. Результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані у фахових наукових виданнях та апробовані на конференціях.

3. Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 зі змінами), а її автор Хільчук М. О. заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка», галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації».

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки
Чернівецького національного
університету імені Юрія Федьковича

Руслан ПОЛІТАНСЬКИЙ

