

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

ВІДГУК

офіційного опонента

Жураковського Богдана Юрійовича

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

З інтеграцією інформаційних технологій, особливо в контексті Інтернету речей (IoT), зростають вимоги до сенсорної електроніки. Ключовими характеристиками сучасних сенсорів стають їхні компактні розміри, здатність працювати від малопотужних джерел живлення з обмеженим енергоспоживанням, програмована реконфігурація та багатофункціональність.

В межах сучасної сенсорної електроніки 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). У сфері інфокомунікаційних систем такі пристрої відомі як сенсорні вузли та описуються термінами "Розумних сенсорів" (SmartSensor), "Розумного пилу" (SmartDust) та "Лабораторії на чіпі" (Lab-on-Chip), використовуючи технології бездротового оптичного зв'язку, такі як OWC (Optical Wireless Communications), FSO (Free Space Opticalcommunication), VLC (Visible Light Communication) та Li-Fi (Light Fidelity). Ці засоби комунікації мають великий потенціал для застосування в локальних мережах (LAN) та особистих мережах (PAN) в рамках IoT та IIoT. Використання "розумних сенсорів" у поєднанні з технологією бездротового зв'язку 5G також актуально. Застосування технології 5G та комунікації фотовольтаїчних сенсорних пристроїв за допомогою Li-Fi дозволяє створити інтелектуальну сенсорну мережу для збору та обробки значних обсягів даних.

Адаптація сигнальні 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. Це може включати використання єдиного фотоперетворювача, наприклад, фотовольтаїчної панелі, у поєднанні з відповідними мультифункціональними сигнальними перетворювачами для виконання поставлених завдань та функцій з фотоосенсорики, фотовольтаїчного живлення та оптичної телекомунікації.

Для оптичних сигналів та інформативних сигналів сенсорної електроніки необхідні відповідні динамічні характеристики, селективність, завадостійкість, лінійність функції перетворення тощо. Розробка фотовольтаїчних сенсорних пристроїв для бездротових мереж також пов'язана із вирішенням проблем енергоефективності фотовольтаїчного живлення. Важливо вирішити завдання ефективного відбору та подальшого перетворення енергії фотовольтаїчного джерела живлення, а також ефективного використання цієї енергії у процесі формування та подальшого перетворення інформативних сигналів сенсорного пристрою.

У контексті розвитку інформаційних технологій, особливо в Інтернеті речей (IoT), зростають вимоги до сенсорної електроніки. Ключовими параметрами сигнальних трактів сучасних сенсорів стають їхня компактність, здатність працювати при низьких напругах та з обмеженим енергоспоживанням, програмована переконфігурація та багатофункціональність. У сенсорній електроніці Інтернету речей виникає поняття аналогового фронт-енду, яке базується на подальшому розвитку та адаптації до IoT змішаного сигнального перетворення, що реалізується через програмовані системи на кристалі.

Актуальним завданням є створення нової моделі фотоелектронної сенсорики в базисі систем на кристалі, яка буде відрізнятись від уже 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 з використанням оптичної телекомунікації. Це передбачає структурно-схемний синтез та параметричний аналіз базових вузлів фронт-енду змішаного сигнального перетворення. Такі сенсорні пристрої повинні відповідати вимогам сумісності з фотовольтаїчними колами живлення та управління, мати низьке енергоспоживання та можливість Rail-to-Rail функціонування, 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 подано 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. З точки зору інфокомунікаційних систем такі пристрої називають сенсорними вузлами (SensorNode) і визначаються поняттями «Розумних сенсорів» (SmartSensor) з електронною комунікацією у відповідності до технологій безпроводного оптичного зв'язку (Optical Telecommunication). Наведено приклади «Розумних сенсорів» в поєднанні з технологією безпроводного зв'язку.

Показано, що в основі завдання з покращення параметричної оптимізації сигнальних перетворювачів фотовольтаїчних сенсорних пристроїв з оптичною телекомунікацією лежить невідповідність щодо вимог до фотоперетворювачів фотовольтаїчних кіл живлення та перетворювачів оптичних трактів формування інформативних сигналів.

Представлена проблематика наукових досліджень та тенденції розвитку в галузі фотоелектронних сенсорів. Наведені характерні приклади сучасних рішень фотоелектронних сенсорів на основі інтегрованих вузлів. Проведено аналіз тематик в концепції злиття даних, і зокрема реалізація цієї концепції в сенсорних мережах в наукових публікаціях. Показано, що основним недоліком в процесах сигнального перетворення фотоелектронних сенсорних пристроїв є значний паразитний вплив стороннього (неінформативного) оптичного випромінювання та електромагнітних завад. Інтенсивність випромінювання сторонніх джерел світла (сонця, ламп освітлення тощо) у сотні, а то і тисячі, раз

перевищує корисну складову зміни оптичного сигналу від активного середовища, спектральна характеристика якого несе інформацію про досліджувану хімічну чи біохімічну речовину.

У другому розділі запропоновано принцип функціонального інтегрування в фотоелектронних сенсорах, проведена оптимізація режимів фотовольтаїчного живлення та режимів живлення сигнальних перетворювачів, розроблені SPICE моделі ефективності перетворення енергії фотовольтаїчного джерела живлення, первинного перетворювача фотодіодного типу та компонентів сигнального тракту. Сформульовано принцип функціонального інтегрування LCPS (LightCommunication&Powering&Sensing), що поєднує сигнальні перетворювачі фотосенсорики, фотовольтаїчного живлення та оптичного зв'язку.

Подано розвиток методу трекінгу точки максимальної енергії MPPT (MaximumPowerPointTracking), проведено аналіз втрат перетворення потужності фотовольтаїчного джерела живлення на робочу точку оптимального відбору енергії. Проведення такого аналізу забезпечує можливість підвищити ефективність фотовольтаїчного живлення з врахуванням втрат в DC-DC конвертерах понижувального чи підвищувального типів.

У третьому розділі вирішено поставлене завдання функціонального інтегрування у фотоелектронних сенсорних пристроях з оптичною телекомунікацією, проведено параметричний аналіз перетворювачів на основі трансімпедансних підсилювачів та гіраторів, дається порівняльний аналіз перехідних процесів в схемах підсилення та інтегрування сигналу, розроблено алгоритмічно-схемне рішення селектора керуючих імпульсів в колі фотовольтаїчного живлення.

Дано подальший розвиток сигнальних перетворювачів фотоелектронних сенсорних пристроїв. Новизною цього розвитку є поєднання функцій трансімпедансного підсилення та програмно-керованого сигнального інтегрування, що вирішує задачу підвищення швидкодії та точності процесу вимірювання. Запропоноване вирішення завдання у відповідності до концепції злиття даних, основою такого рішення є формування масиву результатів вимірювального перетворення при перемиканні режимів роботи РТІС з інверсією напруги на інтегруючому конденсаторі.

У четвертому розділі представлена верифікація запропонованих в дисертаційній роботі рішень та апробація її результатів. Розроблено та створено макет реконфігурованої та програмно керованої платформи прототипування сигнальних перетворювачів LCPS. В склад цієї платформи входять: батареї фотовольтаїчного живлення, енергоощадний гнучкий дисплей на основі технології електронних чорнил e-ink, набір фотодіодів, модуль на основі PSoC 5LP, спеціалізовані вузли аналогового фронт-енду з мікропотужним

споживанням та Rail-to-Rail функціонуванням, радіочастотний модуль Wi-Fi IEEE 802.11, модуль мікроконтролерів STM32 та AVR.

Розроблено та апробовано сигнальний перетворювач PIT (Programmable Impedance Transducer), в якому синтезуються програмовані вузькосмуговий NBT (Narrow Band Transducer) та широкосмуговий WBT (Wide Band Transducer) сигнальні тракти трансїмпедансного типу. Вузькосмуговими трактами забезпечуються вимоги частотної селективності інформативного сигналу, а відтак, високої завадостійкості. Широкасмуговими трактами забезпечуються висока лінійність перетворення в широкій смузі частот, що вирішує такі задачі, як дослідження спектральних характеристик досліджуваних речовин, калібрування сенсорів чи інтегрування в такі сенсори інтелектуальних функцій самодіагностики.

Розроблено та апробовано фронт-енд змішаного сигнального перетворення PTIC (Programmable Trans-Impedance Convertor), що поєднує функції трансїмпедансного підсилення та програмно керованого інтегрування. У відповідності до концепції злиття даних (Data Fussion) забезпечується формування масиву результатів вимірювального перетворення при перемиканні режимів роботи PTIC з інверсією напруги на інтегруючому конденсаторі. Використовуючи цей масив та відповідні алгоритми корекції паразитних дрейфів схеми інтегрування, відділяють 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 (MixedSignalFront-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 SPICEмоделі перетворення енергії фотовольтаїчного джерела та первинного перетворювача фотодіодного типу.
4. З метою подальшого розвитку сигнальних перетворювачів фотоелектронних сенсорних пристроїв 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 PIT (ProgrammableImpedanceTransducer), в якому синтезуються програмовані вузькосмуговий NBT (NarrowBandTransducer) та широкосмуговий WBT (WideBandTransducer) сигнальні тракти трансїмпедансного типу.
6. Розроблено та протестовано фронт-енд (Front-end) змішаного сигнального перетворення PTIC (ProgrammableTrans-ImpedanceConvertor), який комбінує можливості трансїмпедансного перетворення та програмно керованого інтегрування.

5. Практична значимість результатів роботи

Отримані в дисертаційній роботі результати можуть бути застосовані для підвищення ефективності сигнального перетворення у фотоелектронних сенсорних пристроях.

Зокрема :

- Адаптація алгоритму пошуку точки максимальної енергії в DC-DC конвертерах збільшила коефіцієнт корисної дії фотовольтаїчного джерела на 1.5% в рамках досліджуваної SPICE моделі.

- Розроблений фронт-енд (Front-end) сигнального перетворення РТІС дозволив підвистити точність аналого-цифрового перетворення сигналу, забезпечивши масив результатів вимірювань. Використовуючи алгоритми корекції, вдалося більш якісно відокремити корисну та паразитну складові сигналу, забезпечивши високу точність та надійність даних.

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/WebofScience, 2 у збірниках матеріалів доповідей всеукраїнських конференцій, 2 у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій індексованих у наукометричній базі Scopus та WebofScience.

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 першому пункті наукової новизни вказуються технології OWC (Optical Wireless Communications), FSO (Free Space Optical communication), VLC (Visible Light Communication) та Li-Fi (Light Fidelity). Однак, ці технології безпосередньо не розвиваються в дисертаційній роботі, а отже і не потребують згадування з точки зору новизни роботи.

2. Пункт висновку «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» не має новизни. Було б доцільно відзначити, що автор пропонує в розвиток цього твердження.

3. Представляється сумнівним універсальність рішення щодо заміни принципів ближньої комунікації NFC (NearFieldCommunications) на принципи оптичної комунікації. Це різні за сферами використання підходи, а відтак, більш коректно говорити про взаємодоповнювальність цих принципів.

4. Представлена на рис. 2.16 формула, що встановлює ширину смуги робочих частот трансімпедансного підсилювача ТІА, не враховує фактори стабільності його роботи, а отже має обмежене використання. Відтак, результат подальшої оптимізації є також обмеженим у застосуванні.

5. Представлений автором аналіз функціонування схем частотної селекції на основі гіраторів (зокрема, стор. 116) не представляє новизни, а отримані результати (рис. 3.11 – рис.3.17) є типовими для даного класу схем.

6. Ряд наведених в роботі ілюстрацій не є доцільними. Зокрема, вікна конфігурування компонентів PSoC (рис.2.14, рис. 4.3, рис. 4.7) є типовими прикладами програмно-керованих систем і не представляють важливості з точки зору вирішуваних наукових задач.

7. Присутні незначні стилістичні та граматичні помилки.

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 12.01.2017р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», Порядку присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022р. № 44), і може бути розглянута спеціалізованою вченою радою на предмет допуску до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інформаційних систем та технологій
Національного технічного університету
України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»



Богдан ЖУРАКОВСЬКИЙ

Підпис Б.Ю. Жураковського
ЗАВІРЯЮ

Вчений секретар Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»



Валерія ХОЛЯВКО