

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора, професора кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського»

Вербицького Володимира Григоровича

на дисертаційну роботу

Барила Григорія Івановича

“Структурно-параметрична модифікація мікроелектронних сигнальних перетворювачів імпедансу для сенсорної техніки”,

поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка

Сучасний розвиток науки, техніки і промисловості не можливий без використання широкого класу мікроелектронних сенсорних пристроїв і систем на їх основі, які забезпечують високу чутливість та точність вимірювання фізичних величин. Основу функціонування сучасних вимірювальних пристроїв складають сигнальні перетворювачі технічні характеристики яких безпосередньо визначають параметри сенсора чи вимірювальної системи. Традиційні сигнальні перетворювачі на основі відомих фізичних ефектів практично досягли своїх граничних можливостей і тому виникає необхідність пошуку нових підходів та методик для розширення функціональних можливостей мікроелектронної сенсорної техніки. Перспективним напрямком подальшого розвитку сигнальних перетворювачів є використання нових методів імпедансної спектроскопії, за результати якої визначаються вимірювані фізичні величини. Для вимірювання імпедансу використовують сигнальні перетворювачі імпедансу, в яких інформаційний сигнал (напруга чи струм), під впливом активуючого сигналу (струм або напруга). Перетворювачі імпедансу складають основу функціонування сенсорів температури, тиску, аналізаторів газів, біосенсорів, медичних сенсорів тощо. Проте потенційні можливості сигнальних перетворювачів, з погляду сенсорної техніки досліджені недостатньо, не в повній мірі вивчено їх параметри залежно від типу активуючого сигналу (періодичний, неперіодичний, імпульсний) та відхилень параметрів їхніх компонентів, спричинених внутрішніми та зовнішніми факторами. Розширення їхніх функціональних можливостей, підвищення точності значно розширить можливості сучасних пристроїв сенсорної техніки, дасть новий поштовх у розвитку мікроелектронних засобів для дослідження властивостей матеріалів та електронних структур на їх основі. Ефективним засобом в цьому напрямку є використання SPICE моделювання яке забезпечує перевірку нових способів сигнального перетворення, функціональний аналіз схемних рішень, оптимізацію режимів роботи тощо. Проте сучасні методи SPICE моделювання імпедансних характеристик з використанням базових елементів твердотільної електроніки (активних і пасивних компонентів) показала недостатню ефективність сучасних сигнальних перетворювачів імпедансу, оскільки в них не враховуються параметри реальних сигналів – їхня форма, амплітуда, негармонічність, а також зовнішні фактори та фактичні параметри компонентів.

Для розширення функціональних можливостей сигнальних перетворювачів імпедансу необхідно створити нові багатопараметричні моделі базових компонентів – діодів, транзисторів, операційних підсилювачів та джерел сигналів. Дослідження процесів сигнального перетворення імпедансу з використанням таких моделей уможливають

виявлення нових закономірностей у процесі формування інформаційного сигналу, створення нових підходів і методики аналізу реальних спектрів та амплітуд досліджуваних сигналів. Отримані результати моделювання складають основу структурно-параметричної модифікації сигнальних перетворювачів імпедансу, яка забезпечить удосконалення методів обробки сигналу та реалізацію нових схем технічних рішень, відповідно до вимог елементної бази та дасть можливість їх використання в процесі побудови мікроелектронних сенсорних пристроїв.

Тому проведення комплексних досліджень по структурно-параметричній модифікації мікроелектронних сигнальних перетворювачів імпедансу на основі базових елементів твердотільної електроніки та створення нових схем технічних рішень для практичної реалізації сигнальних перетворювачів імпедансу є актуальною науково-прикладною проблемою електронної техніки.

Актуальність роботи підтверджується тим що дисертація тісно пов'язана з науковими держбюджетними темами і виконувалась відповідно до напрямку наукових досліджень Національного університету «Львівська політехніка». Дослідження та розробка нових матеріалів та технології елементів електронної техніки” № ДР 0196U000169; “Розробка нових структур та сенсорів фізичних величин на основі рідкокристалічних та магнітних матеріалів” № ДР 0100U00486; “Розробка нових елементів та пристроїв електронної техніки на основі нанрозмірних органічних структур” № ДР 0113U003196; “Розроблення елементів та структурно-схемних рішень елементів та пристроїв органічної електроніки для реєстрації шкідливих газів” №ДР 0116U004141; “Оптоелектронний вузол пристрою для реєстрації клітинних об'єктів” №ДР 0113U001376.

Структура та зміст дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел інформації. Зміст дисертації належним чином відображає мету роботи, об'єкт і предмет дослідження, основні завдання, проведені теоретичні й експериментальні дослідження та отримані результати.

У вступі подані загальна характеристика роботи та обґрунтування актуальності проведення досліджень з поставленої в дисертації проблеми, визначено мету і задачі досліджень та дані про наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, відомості про їх апробацію.

У першому розділі проведено аналіз сучасних сенсорних пристроїв на основі перетворювачів імпедансу, показано основні сфери їх використання та особливості функціонування в процесі вимірювання. Наведено основні способи вимірювання імпедансу матеріалів та фактори, які впливають на отримані результати. Показано, що одним із перспективних підходів параметричної оптимізації є використання SPICE моделювання. Встановлено необхідність створення нових математичних моделей, які забезпечують відтворення процесу сигнального перетворення з параметрами, які максимально наближаються до реальних. На основі аналізу сучасної мікроелектронної техніки, показано перспективні інтегральні компоненти для реалізації структурних елементів сигнальних перетворювачів імпедансного типу.

Обґрунтовано перспективу розвитку сигнальних перетворювачів імпедансу для сенсорів фізичних величин, які дають можливість проводити високоточні вимірювання в галузі фізики твердого тіла, оптики, хімії, біомедицини і мають значні перспективи розвитку шляхом проведення структурно-параметричної модифікації сигнальних перетворювачів імпедансу для розширення функціональності сенсорних пристроїв імпедансного типу що

забезпечує можливість використання 24-х розрядних АЦП з активацією як періодичними так і неперіодичними (імпульсними) високочастотними сигналами.

У другому розділі обґрунтовано вибір методів досліджень та методик SPICE моделювання сигнальних перетворювачів імпедансу гальваностатичного та потенціостатичного типу. Визначено задачі SPICE моделювання схем імпедансної спектроскопії. Проведено дослідження впливу модуляції параметрів елементної бази в задачах SPICE моделювання. Показано особливості побудови моделей базових вузлів сигнальних перетворювачів імпедансу.

Розроблено нову методику комплексного модельного параметричного дослідження сигнальних перетворювачів імпедансу, яка ґрунтується синхронному квадратурного детектуванні та інтегруванні вихідних напруг сигнального перетворювача відповідно до виразів:

$$V_{SRE} = K_{RE} \int_{t_1}^{t_2} (V_Z(t) \cdot A_{RE}(t)) dt$$

$$V_{SIM} = K_{IM} \int_{t_1}^{t_2} (V_Z(t) \cdot A_{IM}(t)) dt$$

де V_{SRE} та V_{SIM} – напруги, що є інформативними сигналами дійсної та уявної складових імпедансу; K_{RE} та K_{IM} – коефіцієнти пропорційності функції перетворення; $V_Z(t)$ – напруга на досліджуваному двополюснику (гальваностатичний метод вимірювання); $A_{RE}(t)$, $A_{IM}(t)$ – знакові функції, що, в залежності від фази, набувають значення +1 чи -1; t_1 , t_2 – часові інтервали інтегрування.

1. У третьому розділі наведено результати модельних досліджень та параметричного аналізу структурних елементів сигнальних перетворювачів. Представлено узагальнені структурні схеми та елементну базу для практичної реалізації перетворювачів імпедансу. Досліджено вплив елементів підсилювальних каскадів на функцію перетворення. Вперше виявлено паразитний вплив вхідного кола операційного підсилювача при $GBW = 1 \text{ МГц}$, $f = 0.1 \text{ МГц}$ на частотні залежності активної Z_{RE} та реактивної Z_{IM} складових імпедансу. Збільшення коефіцієнта підсилення - K_v призводить до відповідного зростання похибки підсилення інформативної напруги вимірюваного імпедансу. За результатами дослідження вхідних кіл сигнальних перетворювачів встановлено закономірності впливу коефіцієнта підсилення на інформаційний сигнал для неінвертуючого та інвертуючого каскадів. Встановлено, що у вхідних колах сигнального перетворювача гальваностатичного типу використання двох ідентичних повторювачів запобігає ефекту шунтування високоомного вузла струмозадаючого резисторі R_I , та дає змогу здійснити виділення вхідної напруги інформаційного сигналу як різницю $V(V_{ZR}) - V(R_I)$ з мінімізованими частотними спотвореннями.

Під час проведення досліджень та параметричного аналізу кіл потенціометричного типу вперше виявлено частотну нестабільність спричинену резонансними процесами на частотах понад 10 МГц.

У четвертому розділі проведено дослідження сигнальних перетворювачів з розширеними функціональними властивостями та встановлено шляхи їх практичної

реалізації. Наведено результати параметричного аналізу сигнальних перетворювачів імпедансу з активуючими негармонічними сигналами. Встановлено залежності впливу тривалості фронтів та гармонік активуючих сигналів на результати вимірювань. Вперше встановлено немонотонність функції перетворення протягом періоду сигналу під час активації імпульсним сигналом та встановлено вплив роздільної здатності часу інтегрування ΔT на інформативні сигнали SD(V(4)), SD(V(6)), які відповідають значенням $\text{Re}Z$ та $-\text{Im}Z$.

Розроблено методику для аналізу паразитного впливу вищих гармонік імпульсного сигналу на точність сигнального перетворення відповідно до якої корекція результатів вимірювання проводиться за формулами:

$$\text{Re}Z_{COR}(f) = \text{Re}Z_{PLS}(f) - \sum_{k=3}^m K_{RE}(k) \text{Re}Z_{PLS}(kf)$$

$$\text{Im}Z_{COR}(f) = \text{Im}Z_{PLS}(f) - \sum_{k=3}^m K_{IM}(k) \text{Im}Z_{PLS}(kf)$$

де $k = 3, 5, \dots, m$, f – основна частота; kf – частоти гармонік імпульсного сигналу; $\text{Re}Z_{PLS}(f)$, $\text{Im}Z_{PLS}(f)$ – результати вимірювання, відповідно, активної та реактивної складових на основній частоті f імпульсного сигналу; $\text{Re}Z_{PLS}(kf)$, $\text{Im}Z_{PLS}(kf)$ – результати вимірювання, відповідно, активної та реактивної складових на частотах kf гармонік Н3, Н5, Н7...; $\text{Im}Z_{COR}(f)$, $\text{Re}Z_{COR}(f)$ – результати корекції, відповідно, активної та реактивної складових; $K_{RE}(k)$, $K_{IM}(k)$ – коефіцієнти корекції, відповідно, активної та реактивної складових імпедансу.

Використання вказаної методики дозволяє зменшити похибку сигнального перетворення до 0,1% та підтверджує ефективність використання імпульсних активуючих сигналів

Наведено результати дослідження інтеграторів для квадратурних детекторів та встановлено вплив смуги пропускання операційного підсилювача на величину вихідного сигналу. Показано ефективність використання сигнальних перетворювачів з чотиритактним інтегруванням для мікропроцесорної обробки інформації. Вперше виявлено невідповідності малосигнального моделювання при активації імпульсним сигналом, які спостерігаються на нижніх частотах, зокрема на частоті $f = 1\text{E}2$ ця розбіжність становить приблизно 20 %.

У п'ятому розділі проведено комплексне дослідження похибок вимірювання в процесі сигнального перетворення. Проведено розрахунок величини похибок методом цифрової апроксимації гармонічних сигналів. Встановлено залежності похибок калібрування та корегування нуля ЦАП, які виникають похибки формування компенсаційних напруг. Фазові затримки компенсаційних напруг є сталими і визначаються виключно методичними похибками. Внаслідок нелінійності функції перетворення ЦАП виникають гармоніки, близькі до основної, однак при 128 рівнях апроксимації та однобайтному представленні відліків їх рівень не перевищує 60 дБ.

Встановлено вплив статистичних інструментальних похибок на точність формування активуючого та компенсаційного сигналів. Наведено, спричинені динамічними похибками, обмеження діапазону робочих частот сигнального перетворювача імпедансу.

Вперше встановлено, що представлення миттєвих значень гармонічного сигналу на кожному кроці апроксимації числом обмеженого формату приводить до виникнення нових гармонік спектру апроксимованого сигналу. Рівень гармонік, які виникають не перевищує

амплітуд гармонік $d-1$ і $d+1$ сходиноквої апроксимації, проте їх наближення до основної гармоніки вдвічі знижує точність вимірювання.

У шостому розділі представлено результати практичної реалізації сигнальних перетворювачів імпедансу для оптичних сенсорів температури, сенсорів неінвазивної медицини, сенсорів органічної електроніки. На основі структурно – параметричної модифікації розроблено нові підходи побудови широкого ряду сигнальних перетворювачів імпедансу, з високою селективністю інформаційного сигналу та стійкістю до зовнішніх джерел завад.

Розроблені сигнальні перетворювачі імпедансу в поєднанні з сучасними мікропроцесорними системами дозволили отримати ряд нових високоефективних сенсорних пристроїв та дали підстави для побудови перспективних інформаційно-вимірювальних систем для проведення досліджень в сфері матеріалознавства, медицини, органічної електроніки.

Отже, в дисертації Барила Г.І. логічно і послідовно наведені результати досліджень, моделювань, розробок які складають основу структурно-параметричної модифікації сигнальних перетворювачів імпедансу за результатами якої розроблено експериментальні зразки мікроелектронних сенсорних пристроїв.

Тому, отримані результати підтверджують високу ефективність використання розроблених у дисертаційній роботі сигнальних перетворювачів імпедансу та відповідність їх реальних параметрів до результатів досліджень отриманих на основі SPICE моделювання.

Найвагомішими та достовірними результатами, які характеризують наукову новизну роботи та особистий внесок автора можна вважати такі:

В дисертації Барила Г.І. основну увагу зосереджено на вирішенні наукової проблеми проведення структурно-параметричної модифікації мікроелектронних сигнальних перетворювачів імпедансу на основі базових елементів твердо тільної електроніки та створення нових схемотехнічних рішень їх практичної реалізації. До найсуттєвіших наукових результати роботи слід віднести наступні:

1. На основі проведеної структурно-параметричної модифікації розроблено ряд нових структурних вузлів для перетворювачів імпедансу на основі елементів твердотільної електроніки - джерел сигналів, підсилювачів, фільтрів, детекторів, інтеграторів, у яких враховано вплив температури, модуляції параметрів елементів, часової, амплітудної та фазової нестабільності інформаційного сигналу, а також сторонніх джерел сигналів та електромагнітних завад. Створені сигнальні перетворювачі імпедансу забезпечують формування вихідної напруги в межах $-2...2\text{В}$ з похибкою сигнального перетворення $0,1\%$ та ефективним зменшенням рівня шуму на 30 dB з можливістю використання 24-х бітного цифрового конвертора для сенсорної техніки.
2. Розроблено методику підвищення точності синхронного детектування в гальваностатичноому методі вимірювання, яка полягає у зміщенні початкової фази на $\pi/2$ гармонічного коливного струму активуючого сигналу або скороченні тривалості першого імпульсу вдвічі під час активації імпульсами струму прямокутної форми.
3. Розроблено новий метод досліджень параметрів сигнальних перетворювачів імпедансу, який полягає в комплексному дослідженні результатів аналізу електричних кіл при змінному струмі (AC) для ідеалізованого випадку та аналізі перехідних процесів електричних кіл (Transient), під час якого розраховують значення активного ($\text{Re}Z$) та реактивного ($\text{Im}Z$) імпедансу для фактичних параметрів сигналів та елементної бази. Такий розрахунок проводять шляхом синхронного детектування

вихідних сигналів та інтегрування результату детектування в часових інтервалах, які відповідають їхнім активним та реактивним складовим.

4. Розроблено методику модельних досліджень параметрів сигнальних перетворювачів імпедансу з використанням негармонічного активуючого сигналу прямокутної форми, яка використовує розроблені моделі функціональних джерел напруги NFU та струму NFI і дає змогу визначити вплив високочастотних гармонік кратних частоті активуючого сигналу на величину активної та реактивної складових вимірюваного імпедансу, що вдічі підвищує точність перетворення.
5. Вперше виявлено закономірності впливу параметрів компонентів квадратурних детекторів на точність сигнального перетворення front-end сенсорних пристроїв. Встановлено, що коефіцієнти підсилення сигналів у вхідних колах перетворювачів повинні бути мінімально можливими, причому частотні спотворення імпедансних характеристик інвертуючим підсилювачем при $K_v = -1$ в порівнянні з неінтегруючим підсилювачем (повторювачем напруги) при $K_v = 1$ є більшими; а відтак, у вхідних перетворювачах імпедансної спектроскопії пріоритет використання мають повторювачі напруги.
6. В результаті проведеної структурно-параметричної модифікації розроблено основні функціональні вузли сигнальних перетворювачів імпедансу в яких враховано функціональні залежності амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик від параметрів електронних компонентів відхилень активуючих сигналів, впливу зовнішніх факторів та електромагнітних завад.

Дисертація Г.І. Барила має практично-прикладне значення. До найвагоміших практичних результатів слід віднести :

1. Розроблення модифікованих функціональних вузлів сигнальних перетворювачів імпедансу для гальваностатичного та потенціостатичного методу вимірювань.
2. Розроблено частотно-селективні схеми сигнальних перетворювачів імпедансу для оптичних сенсорів з послабленням паразитних складових сигналів від сторонніх джерел сигналів на основі операційних підсилювачів з граничною частотою 1 МГц та ефективним послабленням завад мережі понад 10^4 від частоти інформативного сигналу.
3. Розроблено завадостійкі сигнальні перетворювачі імпедансу для оптичних сенсорів неінвазивної медицини, які уможливають дослідження біомедичних параметрів шляхом комплексного аналізу імпедансу на частотах 0.1 - 12 Гц під час активації оптичним випромінюванням інфрачервоного діапазону в межах 950- 1500 нм.
4. Розроблено сигнальні перетворювачі імпедансу для 24-розрядних конверторів на основі мікроконтролерів ADuC 834 та PSoC, які використовуються для дослідження параметрів органічних напівпровідникових матеріалів та структур на їх основі.
5. Новизна практичних розробок захищена патентами України на корисні моделі.
6. Результати дисертації використовуються під час підготовки спеціалістів напрямку "Електроніка" Національного університету "Львівська політехніка", а також у виробничому процесі наступних підприємств: ПрАТ "Мікроприлад"(м.Львів), ПП "ЕКО-М" (м.Київ), ПАТ "Укртелеком" (м.Чернівці), ВАТ "СКБ МП" (м.Львів), що підтверджено відповідними актами.

Автором розроблено та експериментально підтверджено нові перспективні рішення, які можуть бути використані в процесі проектування мікроелектронних сенсорних пристроїв.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, достовірність і новизну висновків та рекомендацій, запропонованих рішень отриманих дисертантом підтверджується використанням сучасних експериментальних методик і методів, зокрема, методів аналізу та синтезу електричних кіл, теоретичних основ імпедансної спектроскопії; математичного та імітаційного моделювання елементів сигнальних перетворювачів; методів цифрової обробки сигналів, методів статистичної обробки результатів вимірювань.

Отже, експериментальні результати отримані з використанням сучасних програмних засобів та вимірювального обладнання відображають реальні параметри сигнальних перетворювачів, які використані в процесі реалізації ряду сенсорних пристроїв та апробовані на багатьох міжнародних конференціях. Тому отримані результати можна вважати достовірними і перспективними як для подальших наукових досліджень процесі створення мікроелектронних сенсорних пристроїв.

Однак, як і кожна наукова робота, розглянута дисертація та автореферат не позбавлені певних недоліків та зауважень. Серед них відзначаю наступні:

1. Перелік умовних скорочень дисертації, було б доцільно виділити окремим списком на початку дисертації.
2. На мою думку необхідно було провести систематизацію структурних рішень побудови сигнальних перетворювачів імпедансу відповідно до типу сенсорного пристрою.
3. В авторефераті не наведено порівняльних характеристик існуючих та створених сигнальних перетворювачів імпедансу для пристроїв сенсорної техніки.
4. Перший розділ дисертації занадто деталізований відомими схемами і положеннями, напевно слід їх було опустити.
5. В пункті 1.5 дисертаційної роботи представлено опис загальних характеристик електронних компонентів які використовуються для побудови сигнальних перетворювачів, але не наведено посилання на документацію для конкретного типу компонента, а лише узагальнено назвою фірми виробника Analog Devices.
6. Для схеми вхідного кола сигнального перетворювача гальваностатичного типу не вказано параметри частотних спотворень диференційного підсилювача зображеного на ст. 123, рис. 3.17.
7. В схемі квадратурного детектора (рис. 3.51) використано коректувальний конденсатор C_{cr} , проте не зазначено залежності його ємності від частоти перетворення інформаційного сигналу.
8. Не в повній мірі наведено перелік технічних засобів, з допомогою яких досліджено параметри розроблених сигнальних перетворювачів імпедансу.

Однак вказані зауваження і недоліки суттєво не впливають на цінність дисертації в цілому. Результати дисертації опубліковано в 48 наукових працях, зокрема в 1 монографії, 25 статтях у наукових фахових виданнях України, 16 статтях у реферованих журналах, які входять до міжнародних наукометричних баз даних IEEE Xplore Digital Library, Web of Science, Scopus, 33 публікаціях у матеріалах міжнародних і всеукраїнських наукових конференцій та в одному навчальному посібнику. За матеріалами дисертаційної роботи отримано 2 авторських свідоцтва на винаходи та корисні моделі. Що підтверджує повноту висвітлення результатів дисертації у наукових працях та особистий внесок здобувача.

Загальний висновок. Автореферат та дисертація Барила Григорія Івановича “Структурно-параметрична модифікація мікроелектронних сигнальних перетворювачів імпедансу для сенсорної техніки”, оформлені згідно з вимогами ДАК України. На всі друковані праці здобувача, подані в дисертації є посилання. Окрім того, в авторефераті та дисертації чітко сформульовано особистий внесок в роботах, написаних у співавторстві. Висновки дисертації зроблено на основі отриманих результатів автора.

Тому вважаю, що дисертаційна робота Барила Григорія Івановича “Структурно-параметрична модифікація мікроелектронних сигнальних перетворювачів імпедансу для сенсорної техніки” є завершеною науково-дослідницькою роботою, в якій отримано нові, науково обґрунтовані результати та практично-прикладні рішення, які в сукупності комплексно вирішують задачі структурно-параметричної модифікації сигнальних перетворювачів імпедансу для мікроелектронних сенсорних пристроїв на основі базових елементів твердотільної електроніки. Робота має як теоретичне так і практичне значення в галузі створення мікроелектронних сенсорних пристроїв. За актуальністю тематики досліджень, рівнем виконання, науковою новизною отриманих результатів і прикладним значенням вона відповідає вимогам ДАК України. Зміст дисертації відповідає спеціальності 05.27.01 – твердотільна електроніка, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за вказаною спеціальністю.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук,
професор, професор кафедри мікроелектроніки
Київського політехнічного інституту
ім. Ігора Сікорського

Вербицький Володимир Григорович

