

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”**

Барило Григорій Іванович

УДК 621.382.592

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНА МОДИФІКАЦІЯ
МІКРОЕЛЕКТРОННИХ СИГНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ
ІМПЕДАНСУ ДЛЯ СЕНСОРНОЇ ТЕХНІКИ**

05.27.01 - Твердотільна електроніка

АВТОРЕФЕРАТ

Дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів -2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електронних приладів Національного університету “Львівська політехніка” Міністерства освіти та науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Готра Зенон Юрійович,
Національний університет “Львівська політехніка”
завідувач кафедри електронних приладів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Вербицький Володимир Григорович,
Київський політехнічний інститут ім. Ігоря
Сікорського,
професор кафедри мікроелектроніки

доктор технічних наук, професор
Когут Ігор Тимофійович,
Прикарпатський національний університет
імені Василя Стефаника,
завідувач кафедри комп’ютерної інженерії
та електроніки

доктор фізико-математичних наук, професор
Бордун Олег Михайлович,
Львівський національний університет імені Івана
Франка,
завідувач кафедри фізичної та біомедичної
електроніки

Захист дисертації відбудеться “__” червня 2018 року о 14³⁰ на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д 35.052.13 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, Львів-13, С. Бандери 12, ауд.226 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, Львів-13, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий “__” травня 2018 року.

**Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.ф.-м.н., професор**



Д.М. Заячук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Стан розвитку науки та техніки переважно визначається рівнем сучасних технічних елементів, пристроїв електронної техніки, які забезпечують дослідження та виробництво в усіх сферах діяльності людини. Значна увага серед них приділяється пристроям сенсорної техніки. Численні провідні фірми, зокрема Analog Devices (США), Texas Instruments (США), STMicroelectronics (Швейцарія), Dynament (Англія), JUMO GmbH&Co KG (Німеччина), DALI Technology (Китай) виділяють величезні кошти на дослідження та розробку ефективних, технологічно привабливих елементів і структур сенсорної техніки. Чільне місце серед них займають мікроелектронні сенсори вимірювання фізичних величин, складу, параметрів матеріалів та електронних пристроїв на їх основі. Серед них виділяються мікроелектронні сенсори, функціонування яких ґрунтується на основі визначення імпедансних характеристик досліджуваного об'єкта. В зв'язку з тим, що імпеданс є пасивною величиною, його вимірювання здійснюється за допомогою сигнального перетворювача імпедансу (СПІ), який формує вихідний інформаційний сигнал (напруга чи струм) відповідно до значення імпедансу, під впливом активуючого сигналу (струм або напруга). СПІ складають основу функціонування сенсорів температури, тиску, аналізаторів газів, біосенсорів тощо. Однак на сьогодні їхні потенційні можливості, з погляду сенсорної техніки досліджені недостатньо, не в повній мірі вивчено параметри СПІ 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. Для цього необхідно вдосконалити засоби програмного моделювання та провести на їх основі структурно-параметричну модифікацію СПІ. Проведені нами попередні дослідження показали ефективність використання SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis - симулятор електронних схем з відкритим програмним кодом) моделювання, яке забезпечує перевірку нових способів сигнального перетворення, функціональний аналіз схемних рішень, оптимізацію режимів роботи тощо. На основі цього стандарту створюються та постійно оновлюються численні пакети прикладних програм схемотехнічного моделювання, зокрема PSPICE (Personal SPICE), Proteus, LTSPICE (Linear Technology SPICE), MicroCap тощо.

Проведена нами апробація методів SPICE моделювання імпедансних характеристик з використанням базових елементів твердотільної електроніки (активних і пасивних компонентів) показала недостатню ефективність сучасних СПІ, оскільки в них не враховуються параметри реальних сигналів – їхня форма, амплітуда, негармонічність, а також зовнішні фактори та фактичні параметри компонентів.

Для розширення діапазону вимірювання імпедансу від 10 Ом до 1МОм, у частотному діапазоні 0,01 Гц -1 МГц та похибкою вимірювання не більше 0,1%. 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. На основі результатів моделювання необхідно провести структурно-параметричну модифікацію СПІ, яка забезпечить удосконалення методів обробки сигналу та запропонувати нові схемотехнічні рішення, визначити вимоги до елементної бази, що, своєю чергою, створить можливість їх використання для реалізації широкого кола сенсорних пристроїв.

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

Зв'язок роботи з науковими роботами, планами і темами

Результати дисертаційної роботи використані під час виконання науково-дослідних тем 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.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є структурно-параметрична модифікація мікроелектронних сигнальних перетворювачів імпедансу для створення нових сенсорних пристроїв на їх основі.

Для досягнення поставленої мети необхідно розробити та дослідити:

– концепцію побудови нових мікроелектронних сенсорних пристроїв на основі сигнальних перетворювачів імпедансу з розширеними функціональними можливостями;

– SPICE моделі сигнальних перетворювачів імпедансу та їхніх функціональних вузлів, а також методи математичного аналізу інформативного сигналу для підвищення точності сигнального перетворення з урахуванням фазочастотних параметрів активуючих джерел сигналів, температури, модуляції параметрів елементів, часової нестабільності амплітуди, фази, а також впливу зовнішніх джерел сигналів та електромагнітних завад;

– моделі функціональних вузлів, які описують комплексні залежності параметрів компонентів і досліджуваних двополюсників для побудови нових сенсорів для дослідження матеріалів та електронних структур органічної електроніки;

– нові схемотехнічні рішення функціональних вузлів сигнальних перетворювачів імпедансного типу з мінімізацією впливу гармонік на інформаційний сигнал у разі активації досліджуваних структур негармонічними сигналами;

– мікроелектронні структури обробки інформаційного сигналу на основі синхронного детектування для розширення функціональності вимірювального перетворення імпедансу та підвищення точності які дають змогу реалізувати принцип надлишковості сигналів та проводити перевірку калібрування сигнальних трактів і компенсацію їх дрейфу нуля та здійснювати безпосереднє інтегрування інформативного струму через досліджуваний двополюсник в перетворювачах потенціостатичного типу;

– залежність впливу параметрів компонентів квадратурних детекторів на точність сигнального перетворення front-end сенсорних пристроїв та визначити їхні робочі режими у вхідних колах сигнальних перетворювачів на основі операційних підсилювачів, які забезпечували б мінімальні частотні спотворення імпедансних характеристик та необхідний рівень вхідного сигналу.

Для практичної реалізації мети роботи необхідно розробити:

– структурні та схемотехнічні підходи для побудови конвертерів імпедансу сигнальних перетворювачів для оптичних сенсорів з високою селективністю інформативного сигналу та ефективним послабленням паразитних складових сигналів від сторонніх джерел світла та електромагнітних завад. Реалізувати частотно-селективні схеми сигнальних перетворювачів для оптичних сенсорів з послабленням паразитних складових сигналів від сторонніх джерел сигналів на основі операційного підсилювача з граничною частотою 1 МГц та ефективним послабленням завад мережі понад 10^4 від частоти інформативного сигналу;

– завадостійкий сигнальний перетворювач імпедансу для оптичних сенсорів неінвазивної медицини, який дає змогу здійснювати дослідження біомедичних параметрів шляхом комплексного аналізу імпедансу;

– нові сенсорні пристрої для дослідження провідності органічних напівпровідникових матеріалів з використанням спеціалізованих моделей типу елемента Варбурга для частотного діапазону 0,01Гц-100 кГц та реалізувати структури оптичних сенсорів імпедансного типу та інформаційно-вимірювальних систем на основі сучасних продуктивних мікропроцесорних систем ADuC 834 та PSoC, з інтегрованими каналами передачі даних для комп'ютерного аналізу результатів вимірювань.

Об'єкт дослідження – мікроелектронні сигнальні перетворювачі імпедансу

Предмет досліджень – методи вимірювання імпедансу; математичні моделі, структурні елементи та електрофізичні параметри мікроелектронних сигнальних перетворювачів імпедансу.

Методи досліджень. Для вирішення наукових завдань, поставлених у дисертації, використовувались: аналіз науково-технічної літератури та інформаційних матеріалів із баз мережі Інтернет; методи аналізу та синтезу електричних кіл, теоретичні основи імпедансної спектроскопії; математичне та

імітаційне моделювання елементів сигнальних перетворювачів; методи цифрової обробки сигналів, методи статистичної обробки результатів вимірювань.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. На основі досліджень запропонованих узагальнених структурних схем мікроелектронних СП, які базуються на гальваностатичному та потенціометричному методі вимірювань, виявлено нові закономірності функції перетворення від параметрів активуючого сигналу та відхилень параметрів їхніх компонентів, спричинених внутрішніми та зовнішніми факторами, що покладено в основу і структурно-параметричної модифікації СП. 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. Такі СП 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. Вперше SPICE моделюванням встановлено, що для зменшення часу встановлення стаціонарного коливного процесу та підвищення точності синхронного детектування в гальваностатичному методі вимірювання початкова фаза гармонічного коливного струму активуючого сигналу повинна бути зміщена на $\pi/2$. Для усунення впливу перехідних процесів під час активації імпульсами струму прямокутної форми необхідно вдвічі скоротити тривалість першого імпульсу.

3. Розроблено новий метод досліджень параметрів СП, який полягає в комплексному дослідженні результатів аналізу електричних кіл при змінному струмі (АС) 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 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 двополоснику (гальваностатичний метод вимірювання); $A_{RE}(t)$, $A_{IM}(t)$ – знакові функції, що, залежно від фази, набувають значення $+1$ чи -1 ; t_1 , t_2 – часові інтервали

інтегрування. Активна складова вихідного сигналу детектується та інтегрується синфазно із задавальним вхідним сигналом, а реактивна складова – з фазовим зміщенням на $\pi/2$.

4. Вперше встановлено закономірності виникнення похибок, спричинених впливом гармонік імпульсного сигналу під час активації досліджуваних структур негармонічними сигналами. На основі результатів модельних досліджень запропоновано проводити коригування значень імпедансу :

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} Z_{COR}(f) &= \operatorname{Re} Z_{PLS}(f) - \sum_{k=3}^m K_{RE} \left(\operatorname{Re} Z_{PLS}(kf) \right), \\ \operatorname{Im} Z_{COR}(f) &= \operatorname{Im} Z_{PLS}(f) - \sum_{k=3}^m K_{IM} \left(\operatorname{Im} Z_{PLS}(kf) \right), \end{aligned}$$

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

5. Розроблено методику модельних досліджень параметрів СПІ 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.

6. 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.

7. Для розширення функціональності вимірювального перетворення імпедансу та підвищення точності вимірювання використано чотиритактне інтегрування інформаційного сигналу, яке дає змогу реалізувати принцип надлишковості сигналів та проводити перевірку калібрування сигнальних трактів і компенсацію їхнього дрейфу нуля та здійснювати безпосереднє інтегрування інформативного струму через досліджуваний двополосник у перетворювачах потенціостатичного типу. Вперше показано можливість розширення функціональності вимірювального перетворення імпедансу з використанням методу чотиритактного інтегрування сигналу, яке полягає у формуванні чотирьох

інформативних сигналів, зокрема напруг V_{Q1} , V_{Q2} , V_{Q3} та V_{Q4} , кожна з яких відповідає результатам інтегрування у відповідних чотирьох тактах (чверть-періодах) сигналу активації. Знакові функції $A_{Q1}(t)$, $A_{Q2}(t)$, $A_{Q3}(t)$, $A_{Q4}(t)$, що визначають ці сигнали, приймають значення 1 в інтервалах часу: $A_{Q1}(t) = 1 @ t = [0...π/2]$; $A_{Q2}(t) = 1 @ t = [π/2...π]$; $A_{Q3}(t) = 1 @ t = [π...3π/2]$; $A_{Q4}(t) = 1 @ t = [3π/2...2π]$.

8. Проведено структурно-параметричну модифікацію СПІ на основі мікропотужних операційних підсилювачів та швидкодіючих аналогових комутаторів. Встановлено залежності амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик від смуги пропускання операційних підсилювачів. Показано, що перевагою розроблених конвертерів імпедансу є висока завадостійкість з відношенням сигнал-шум понад 85 дБ.

9. На основі розроблених високочутливих СПІ створено органічні сенсорні структури для визначення рухливості носіїв заряду, гібридні органо-неорганічні структури для визначення інтенсивності ІЧ випромінювання, сенсорні пристрої та вимірювальні системи неінвазивної медицини для вимірювання параметрів біоматеріалів, а також оптичні сенсори для визначення параметрів речовин і газових середовищ.

Практичне значення одержаних результатів. За результатами досліджень розроблено:

- функціональні вузли СПІ для гальваностатичного та потенціостатичного методу вимірювань;

- частотно-селективні схеми СПІ 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;

- завадостійкі СПІ 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;

- перетворювачі імпедансу для дослідження провідності органічних напівпровідникових матеріалів з використанням спеціалізованих моделей типу елемента Варбурга для частотного діапазону 0,01Гц - 100 кГц та структури оптичних сенсорів імпедансного типу та інформаційно-вимірювальних систем на основі сучасних мікропроцесорних систем ADuC 834 та PSoC з інтегрованими каналами передачі даних, які використовуються для комп'ютерного аналізу результатів вимірювань.

Новизна практичних розробок захищена патентами України на корисні моделі. Результати дисертації використовуються під час підготовки спеціалістів напрямку “Електроніка” Національного університету “Львівська політехніка”, у ході виконання науково-дослідних робіт на підприємствах електронної промисловості. Результати впровадження підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі узагальнені результати теоретичних та експериментальних досліджень, виконаних автором самостійно і у співавторстві, де йому належить вибір і обґрунтування напрямків досліджень, постановка задач, розробка методів вимірювання фізичних величин на основі сигнальних перетворювачів імпедансу. За участю автора були розроблені та експериментально досліджені макети сигнальних перетворювачів для пристроїв неінвазивної медицини, оптичних сенсорів фізичних величин, інформаційно-вимірювальних систем для дослідження пристроїв органічної електроніки. Основні наукові результати, подані в дисертації, автор отримав особисто. В наукових працях, опублікованих у співавторстві основні результати, отримано за безпосередньої участі автора на всіх етапах роботи. Основні результати дослідження та структурно-параметричної модифікації мікроелектронних сигнальних перетворювачів імпедансу для сенсорної техніки наведено в монографії [1]. Теоретичне обґрунтування методик структурно-параметричної модифікації мікроелектронних СПІ представлено в роботах [2-6,34,39,40,42,46]. Автором розроблено методики підвищення точності вимірювань СПІ гальваностатичного [31-34,47-48] та потенціометричного [7] типу, розроблено SPICE моделі квадратурного синхронного детектора [3,7], досліджено модуляцію параметрів електронних компонентів у задачах SPICE моделювання [11,39], проведено структурно-параметричний аналіз СПІ під час активації негармонічними сигналами [6,27-29,44,45], досліджено СПІ на основі синхронного детектора [15,16], досліджено входні кола та пристрої комутації СПІ [33,36,43], встановлено ефективність використання чотиритактного детектування, яке забезпечує додаткову інформативність корисного сигналу [17], проведено параметричну оптимізацію активних фільтрів другого порядку синхродетекторів [41], розроблено СПІ для дослідження параметрів органічних матеріалів [13,16,18-20,23], досліджено та розроблено СПІ для медичних пристроїв на основі неінвазивних методів вимірювань [8-11,15,17,22,24,35], розроблено синхронні детектори вимірювальних перетворювачів імпедансу для оптичних сенсорів фізичних величин [12,14,21,25-27,30].

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались та обговорювались на: Чотирнадцятій та П'ятнадцятій відкритих науково-технічних конференціях Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету "Львівська політехніка" з проблем електроніки (Львів, 2011-2012); I-шій Міжнародній науково-практичній конференції «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (Кременчук, 2011); XX Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2012); VIIIth International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (Львів, 2012); II Міжнародній науково-практичній конференції Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікації, нано- та мікроелектроніки (Чернівці, 2012); VI International conference on optoelectronic information technologies "Photonics-ODS 2012" (Вінниця, 2012); 6th International Forum on Innovative Technologies for Medicine

(ITMED 2012) (Poland, 2012); Proceedings of International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, (TCSET'2012) (Lviv-Slavske, 2012); IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO) (Київ, 2013); 7th and 8th International Forum Science and Technology Days Poland –East (Poland, 2013-2014); International Conference Baltic Polymer Symposium (BPS-2013) (Lithuania, 2013); Proceedings of the XIIth International Conference (Lviv-Slavske, 2014); 8th International Forum on Innovative Technologies for Medicine (Poland, 2014); The XIIIth International Conference “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics” (Polyana-Svalyava (Zakarpattya), 2015); IEEE Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (Київ, 2016); Vth International Scientific Practical Conference “Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems (Чернівці, 2016); XVII міжнародній науково-технічній Конференції Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (Одеса, 2017); Міжнародній науково-практичній конференції "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання" (Івано-Франківськ, 2017); 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT) (Львів, 2017); IX Українсько-польській науково-практичній конференції "Електроніка та інформаційні технології" (ЕЛІТ-2017) (Чинадієво, 2017).

Публікації. 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.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновку та списку літератури. Вона містить 299 сторінок тексту, 220 рисунків, 13 таблиць та 292 використаних джерела літератури.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано загальну характеристику роботи, в якій виділено актуальність, мету та задачі досліджень, наукову новизну практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про апробацію результатів дисертації та публікації.

У першому розділі проведено аналіз сучасних мікроелектронних сенсорних пристроїв на основі СПІ, показано основні сфери їх використання та особливості функціонування в процесі вимірювання.

На основі проведеного аналізу встановлено перспективу розвитку сигнальних перетворювачів імпедансу для сенсорів фізичних величин, які дають можливість проводити високоточні вимірювання в галузі фізики твердого тіла, оптики, хімії, біомедицини та мають значні перспективи розвитку.

Встановлено, що існуючі інтегральні СПІ не повною мірою забезпечують проведення високоточних вимірювань, оскільки сучасні виробники електронної техніки, зокрема лідер виробництва інструментальних Analog Devices, використовують не більше ніж 12-розрядні АЦП в каналі перетворення імпедансу з частотою активуючого сигналу до 100 кГц, що недостатньо для проведення точних вимірювань.

Показано, що основними проблемами в процесі побудови сигнальних перетворювачів імпедансу є забезпечення лінійності амплітудно-частотних (АЧХ) та фазочастотних (ФЧХ) характеристик активуючого сигналу в межах діапазону вимірювання та мінімізація спотворень, які виникають внаслідок паразитного впливу та зумовлені неідеальними характеристиками елементів перетворювача. Сумарна частотна та температурна похибка вимірювання імпедансу сучасних інтегральних перетворювачів імпедансу складає до 2%, що вимагає використання додаткових схемотехнічних рішень для усунення впливу цих факторів.

Конкретизовано проблему та сформульовано мету структурно-параметричної модифікації мікроелектронних сигнальних перетворювачів імпедансу для сенсорної техніки. Показано, що однією з основних проблем сигнального перетворення є відсутність методик проведення параметричного аналізу сигнальних перетворювачів, а саме, їхніх структурних елементів, які загалом визначають точність і достовірність результатів вимірювання. Вирішення цієї проблеми вимагає розширення можливостей сучасних засобів програмного та математичного моделювання шляхом створення нових моделей функціональних вузлів – функціональних джерел сигналів, вхідних кіл, підсилювачів, синхронних детекторів, інтеграторів, а також використання нових підходів до проведення структурно-параметричного аналізу сигнальних перетворювачів.

Проведений аналіз показав можливість структурно-параметричної модифікації сигнальних перетворювачів імпедансу для розширення функціональності сенсорних пристроїв імпедансного типу, що забезпечує можливість використання 24-розрядних АЦП з активацією як періодичними, так і неперіодичними (імпульсними) високочастотними сигналами.

Показано перспективу використання високоточних сигнальних перетворювачів імпедансу в нових сенсорних пристроях, а також в інформаційно-вимірювальних системах електронної техніки.

У другому розділі обґрунтовано вибір методів досліджень та методик вимірювання параметрів СПІ, проведено адаптацію методик математичного SPICE моделювання до проблем імпедансної спектроскопії та розроблено нові підходи, які підвищують ефективність дослідження СПІ. Розроблено новий метод досліджень перетворювачів імпедансної спектроскопії на основі комплексного аналізу схем із поєднанням двох типів аналізу - АС та Transient. В ході АС аналізу отримані імпедансні діаграми Найквіста для ідеалізованого випадку. Натомість, під час Transient аналізу розраховують значення активного ReZ та реактивного ImZ 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. Активна складова вихідного сигналу детектується та інтегрується синфазно із задавальним вхідним сигналом, а реактивна складова – з фазовим зміщенням на $\pi/2$. Таке сигнальне перетворення проводять шляхом синхронного квадратурного детектування та інтегрування вихідних напруг сигнального перетворювача відповідно до виразів:

$$V_{SRE} = K_{RE} \int_{t_1}^{t_2} \langle V_Z(t) \cdot A_{RE}(t) \rangle dt, \quad V_{SIM} = K_{IM} \int_{t_1}^{t_2} \langle V_Z(t) \cdot A_{IM}(t) \rangle dt,$$

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 (рис. 1). Значення знакових функцій $A_{RE}(t)$, $A_{IM}(t)$ у кожному періоді T визначаються часовими інтервалами: $A_{RE}(t) = 1$ при $t = [0 \dots \pi]$, $A_{RE}(t) = -1$ при $t = [\pi \dots 2\pi]$; $A_{IM}(t) = 1$ при $t = [0 \dots \pi/2]$ та $[3\pi/2 \dots 2\pi]$, $A_{IM}(t) = -1$ при $t = [\pi/2 \dots 3\pi/2]$.

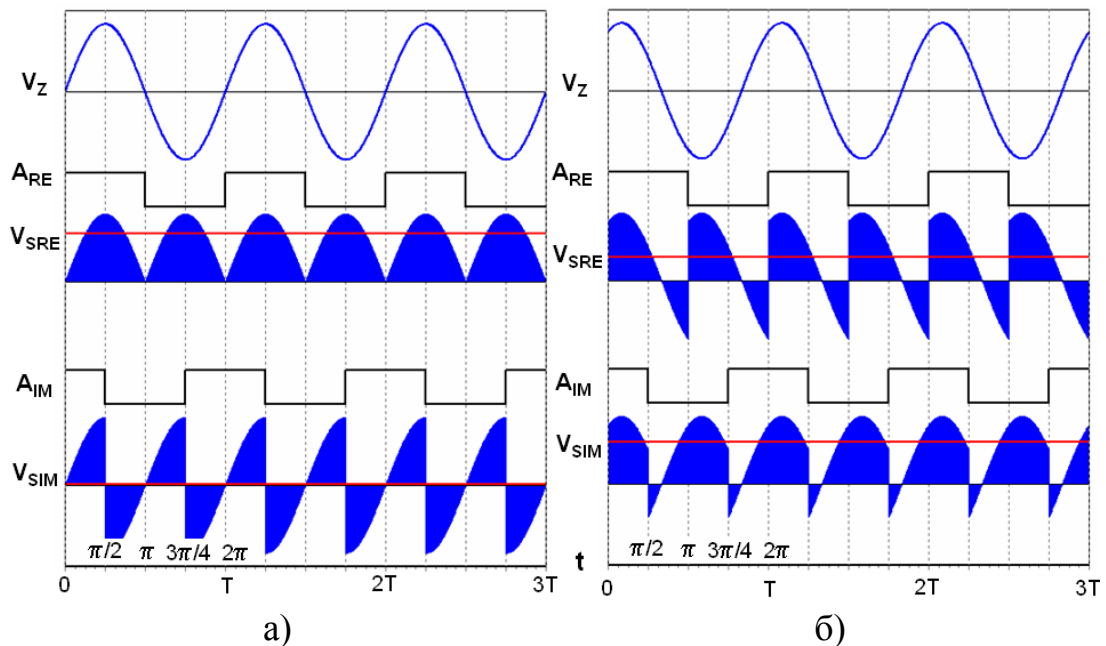


Рис. 1. Епюри сигналів перетворювача для зсуву фази напруги 0° (а) та 60° (б)

В процесі функціонування синхронного детектора виникає часова нестабільність пов'язана з перехідними процесами стабілізації коливань (рис. 2). Встановлений усереднений рівень коливань, стала часу якого визначається добутком активного та реактивного опорів. Для усунення перехідних процесів стабілізації використовується певна затримка перед подальшим етапом перетворення, однак такий спосіб негативно впливає на продуктивність процесу сигнального перетворення, адже в імпедансній спектроскопії необхідно забезпечити сканування при великій кількості значень частоти. Ця проблема нами

вирішена за рахунок запропонованого алгоритму вимірювання, коли початкова фаза задавального струму зміщена на $\pi/2$. Для такого алгоритму, як це можна бачити на епюрах рис. 3, відсутній перехідний процес установлення усередненого рівня коливань.

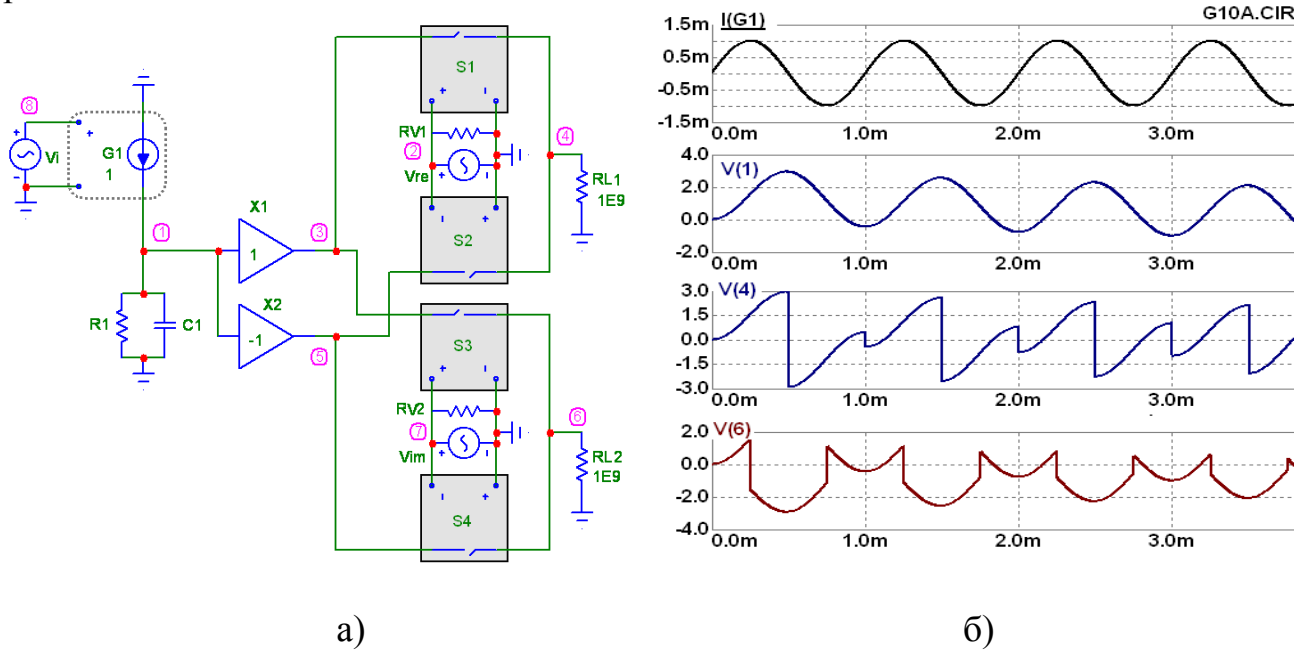


Рис. 2. Модель синхродетектора (а) та діаграма його сигналів з врахуванням перехідних процесів (б)

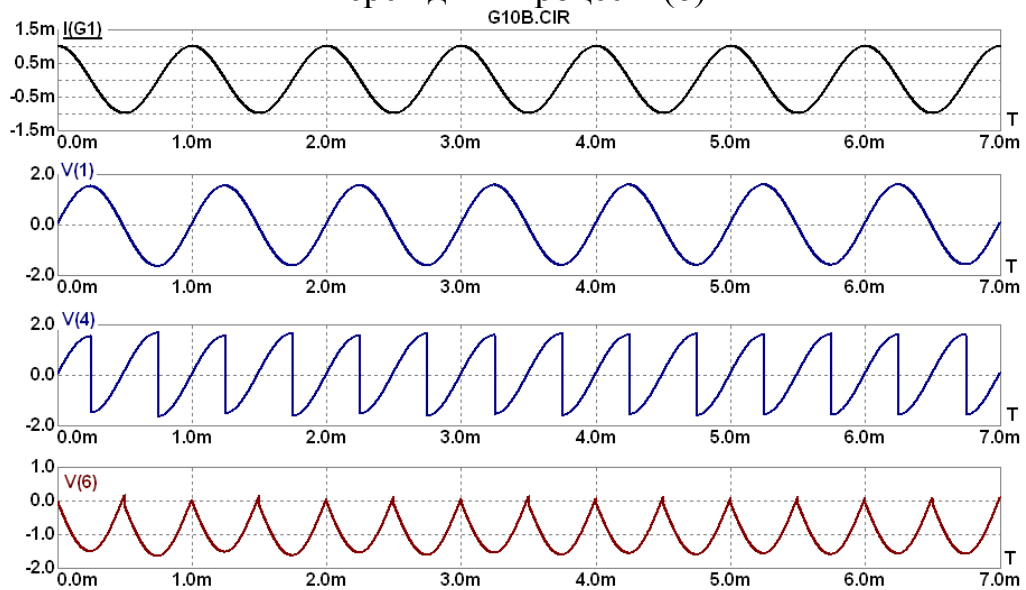


Рис. 3. Епюри сигналів із зміщенням сигналу на $\pi/2$

Нами розглянуто перехідний процес при активації імпульсами струму прямокутної форми, який базується на скороченні вдвічі тривалості першого імпульсу, зокрема, як це показано на рис. 4, блокуванням його першої половини. Для цього використано ключ $S1$ та джерело $V2$. Результатом такого рішення є миттєве встановлення постійного значення сталої складової сигналу.

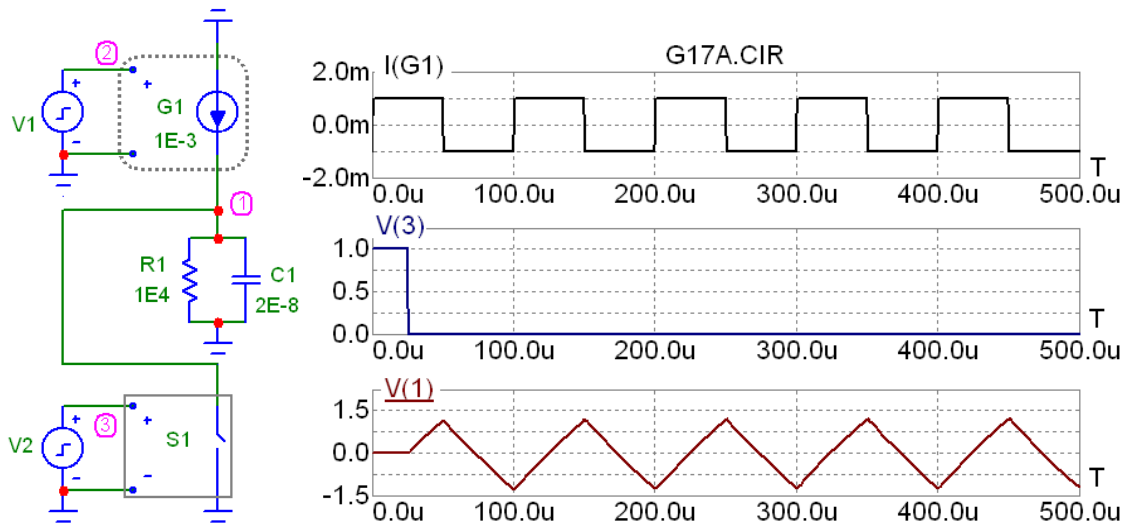


Рис. 4. Схема та епюри сигналів зі скороченням тривалості першого імпульсу

Відповідно до результатів моделювання проведена практична реалізація синхродетектора СПІ для оптичного сенсора, з активацією імпульсами прямокутної форми, зображення електричної схеми якого представлено на рис .5.

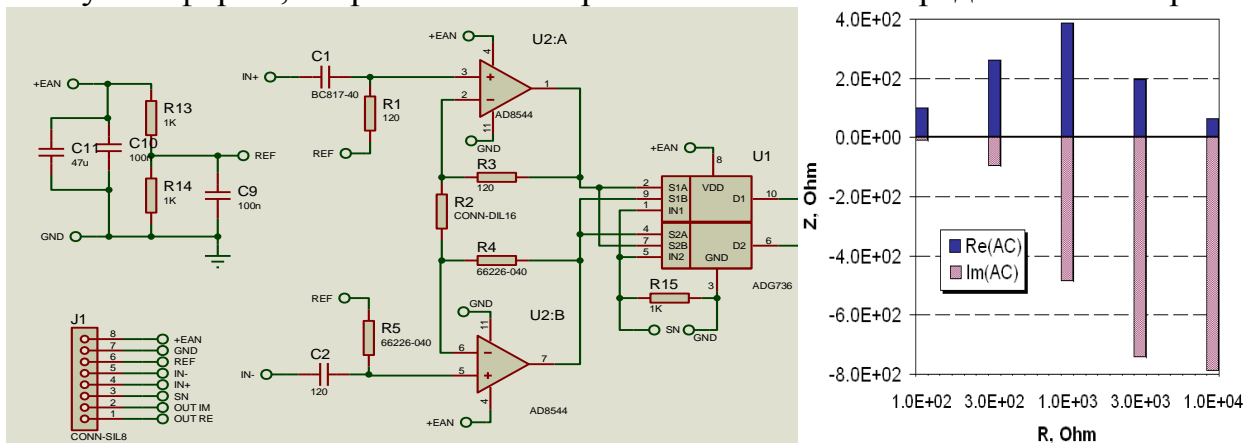


Рис. 5. Практична реалізація синхродетектора та залежності його імпедансних характеристик

Третій розділ дисертації присвячено модельним дослідженням та параметричному аналізу структурних елементів сигнальних перетворювачів імпедансу. Розроблені структурні схеми мікроелектронних сенсорних пристроїв імпедансного типу, що базуються на двох основних методах вимірювання - гальваностатичному (рис.6, а) та потенціостатичному (рис. 6, б). Основними елементами є: CS (Current Source) – джерело гармонічного струму чи VS (Voltage Source) – джерела гармонічної напруги з керованою частотою; VTA (Voltage Transducer and Amplifier) – широкосмугові перетворювачі та підсилювачі вхідних сигналів та CTA (Current Transducer and Amplifier) – вхідні кола на перетворювачах та підсилювачах сигналів; SD (Synchronous Detector) – синхронні детектори; INT (Integrator) – інтегратори; LFA (Low Frequency Amplifier) – підсилювачі вихідних низькочастотних сигналів; ADC (Analog-to-Digit Converter) – АЦП; MC (Microcontroller) – мікроконтролери, які здійснюють керування

пристроєм та подальше перетворення цифрових сигналів – CT & DS (Control & Digit Signal).

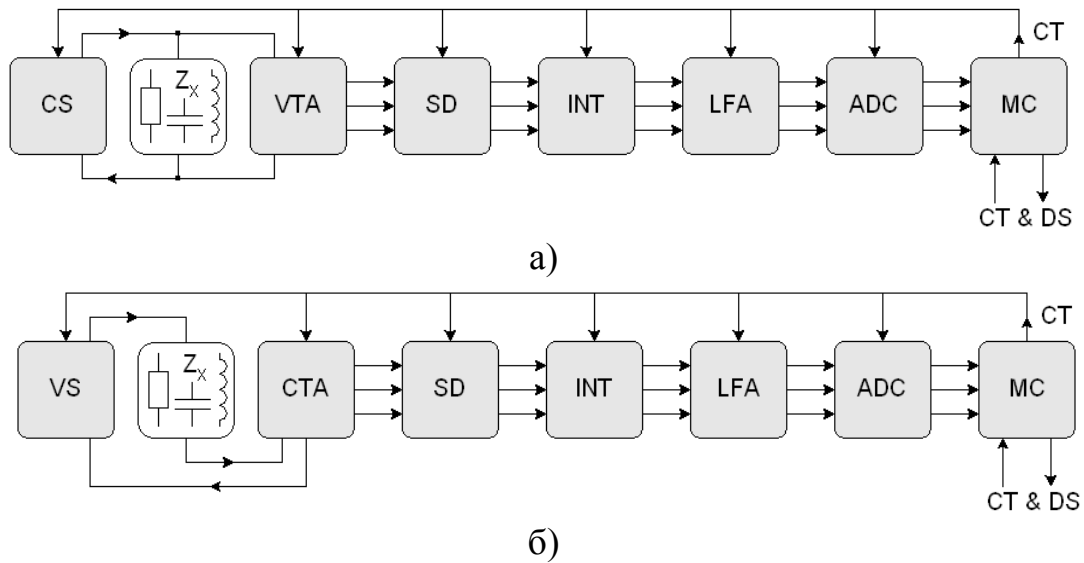


Рис.6 Узагальнена структурна схема СПІ гальваностатичного (а) та потенціостатичного типу (б)

Для дослідження впливу підсилювальних каскадів на імпедансну характеристику синтезовано SPICE схему заміщення (рис. 7, а), яка містить джерело синусоїдальної напруги V_i , кероване цією напругою джерело струму $G1$ з коефіцієнтом передачі $K_I = 1$, $R_x C_x$ ланку з характерною частотою $f_0 = 0,1$ МГц ($R_x = 1$ кОм, $C_x = 1,591$ нФ), розв'язуючий підсилювач $X0$ з ідеалізованими параметрами та два досліджувані каскади на операційних підсилювачах $X1, X2$.

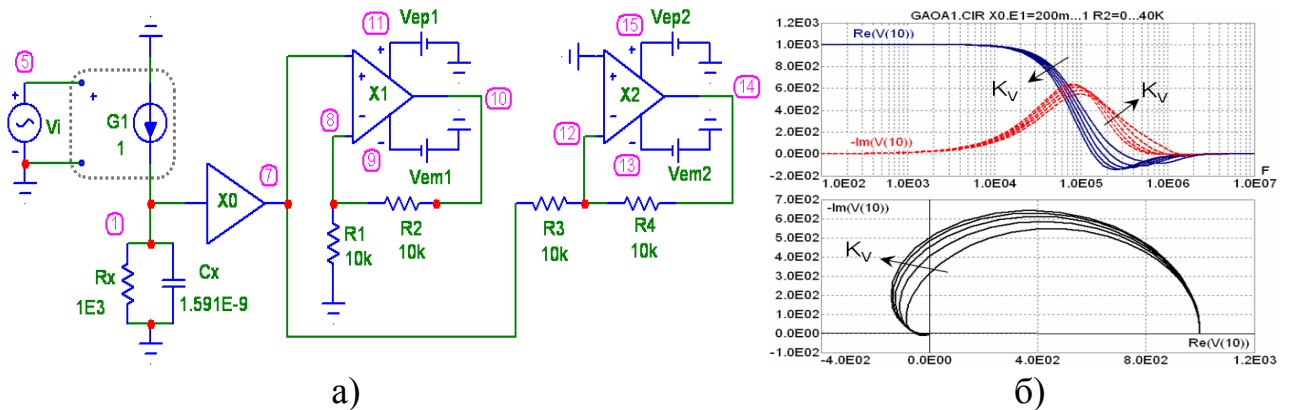


Рис. 7. Розроблена модель підсилювального каскаду СПІ

Перший підсилювач є неінвертувальним із коефіцієнтом підсилення напруги $K_V = 1 + R2/R1$, а другий – інвертувальним із $K_V = -R4/R3$. Розв'язуючий підсилювач $X0$ є допоміжним і виконує дві функції: по-перше, він запобігає паразитному шунтуванню $R_x C_x$ ланки. Отримані результати показують, що для вищезгаданих значень $GBW = 1$ МГц, $f_0 = 0,1$ МГц існує доволі значний дрейф активної Z_{RE} (інформативний сигнал – $Re(V(10))$) та реактивної Z_{IM} (інформативний сигнал – $Im(V(10))$) складових імпедансу (рис.7, б). Отже, значної

зміни зазнає діаграма Найквіста, деформуючись на високих частотах у ділянку з від'ємними значеннями активної складової імпедансу. Такий дрейф і деформація спостерігаються навіть при одиничному $K_v = 1$ підсиленні (режим повторювача напруг). Збільшення K_v призводить до відповідного зростання похибки підсилення інформативної напруги вимірюваного імпедансу. Відповідно, під час розроблення сигнальних перетворювачів імпедансу необхідно, по-перше, враховувати ці похибки і, по-друге, встановлювати коефіцієнт підсилення на мінімально можливому рівні.

У вхідних колах СПІ гальваностатичного типу виникає проблема виділення напруги V_{ZR} інформативного сигналу імпедансу двополюсника Z_x (рис.8). Ця напруга є сумою двох складових – напруги $V(V_{ZR})$ на двополюснику V_{ZR} та напруги $V(R_i)$ на резисторі R_i . Незважаючи на те, що в першому наближенні напруга $V(V_i)$ відповідає напрузі задавального джерела SG і вважається сталою адитивною складовою, таке наближення, призводить до значних похибок вимірювання імпедансу. Очевидно, що мінімізація таких похибок передбачає елементарну з погляду схемотехніки процедуру віднімання напруг $V(V_{ZR}) - V(R_i)$. Її здійснюють різницевим (диференційним) підсилювачем, серед основних вимог до якого можна назвати мінімальне шунтування вхідного кола та мінімальне частотне спотворення імпедансної характеристики. Враховуючи наведені раніше міркування щодо таких спотворень каскадами підсилення та пріоритетності використання переважно повторювачів напруг, до схеми перетворювача введено два повторювачі на операційних підсилювачах OA_2, OA_3 .

Розроблено схеми вхідних кіл гальваностатичного типу (рис. 8, а), а результати досліджень (рис. 8, б) з шириною смуги робочих частот (GBW) мікропотужних операційних підсилювачів AD8541/2/4 до 1МГц)

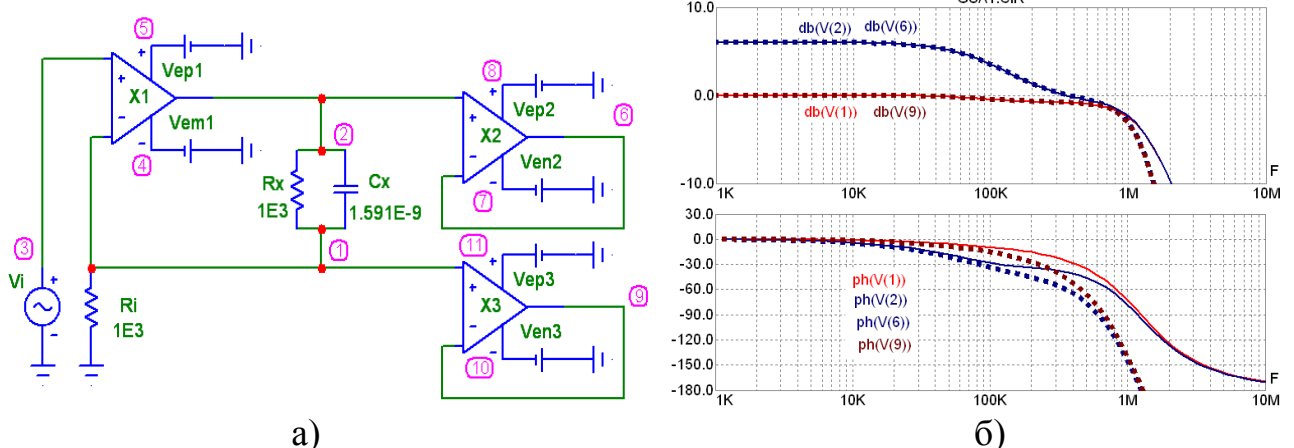


Рис. 8. Схема модельного дослідження вхідних кіл гальваностатичного методу вимірювання

В процесі дослідження вхідних кіл потенціометричного типу СПІ необхідно забезпечити мінімізацію шунтувального впливу досліджуваного двополюсника на задавальне джерело SG необхідно використовувати повторювач напруги ОА. Вказане падіння напруги на резисторі R_i є оберненою функцією до сигнального

імпедансу (тобто, провідністю двополюсника), що необхідно враховувати в ході модельних досліджень (рис. 9, а), інформативні сигнали складових імпедансу $Re(1/V)$ та $Im(1/V)$). Опір резистора $R1$, а отже, падіння напруги на ньому, повинні бути мінімізованими. Цю задачу виконує трансімпедансний перетворювач на операційному підсилювачі OA_2 , який і є вищезгаданим широкосмуговим перетворювачем СТА вхідного струму у вихідну напругу). Крім того, враховуючи, що операційний підсилювач OA_2 інвертує фазу вхідного струму, інформативні сигнали змінюють свій знак: $Re(-1/V)$ та $Im(-1/V)$. При дослідженнях та в ході параметричного аналізу вхідних кіл потенціометричного типу виявлено проблему значної частотної нестабільності перетворювачів такого типу через резонансні процеси, які в свою чергу, призводять до втрати стабільності кола схеми (рис. 9, б).

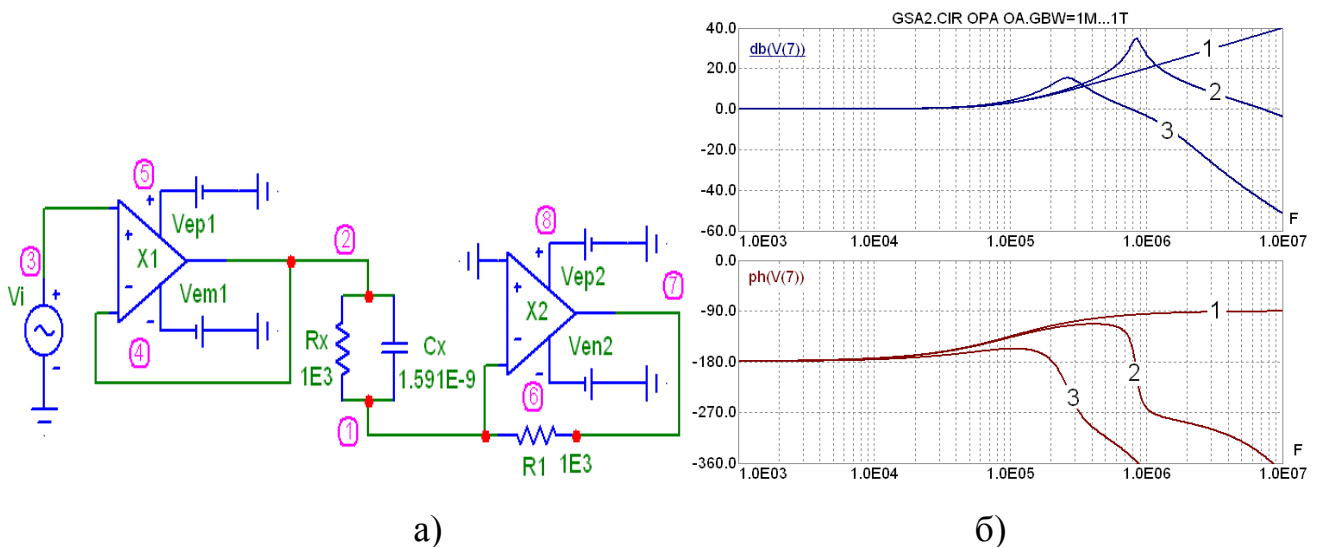


Рис. 9. Модель а) та АЧЧ та ФЧХ вхідного кола потенціометричного типу при $GBW = 1E12$ (1), $1E7$ (2), $1E6$ (3)

Для проведення параметричного аналізу розроблено методику комплексного модельного дослідження СПІ на основі розроблених синхронних детекторів, яка поєднує АС та Transient аналіз. Кількісними параметрами, які використовуються для аналізу точності функціонування квадратурного детектора, є відношення отриманих Transient аналізом значень вихідних напруг V_{RE} та V_{IM} до їхніх ідеалізованих значень, отриманих АС аналізом. Аналіз проводимо, використовуючи вищезгаданий RC двополюсник із характерною частотою $f_0 = 0,1$ МГц ($R_x = 1E3$, $C_x = 1.591E3 - 9$).

Для мінімізації впливу інших вузлів сигнального перетворювача на результати наведеного далі параметричного аналізу квадратурного детектора забезпечуємо дві умови: по-перше, використаємо ідеалізовану модель задавального джерела струму, по-друге, вихідні інформативні сигнали формуємо виключно на математичному рівні (без використання вузлів на фізичному рівні). Схема заміщення квадратурного детектора та результати коригувань в якій реалізовано зазначені умови, наведена на рис. 10. Для формування вихідних сигналів, нами використано функцію - $SD(V(X))$, де X – номер вузла, на якому

напряга $V(X)$ інтегрується за часом: Running integral with respect to time базового набору середовища MicroCAP.

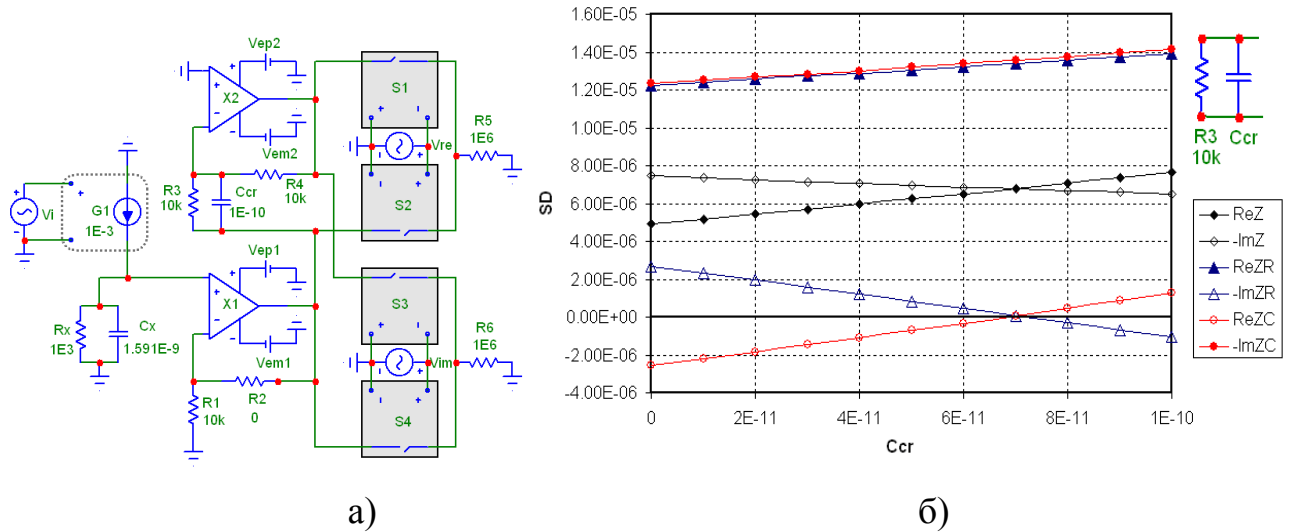


Рис. 10. Схема квадратурного детектора з частотною корекцією (а) та результати коригувань (б)

Усунення частотного спотворення в схемі інвертувального підсилювача, забезпечується конденсатором C_{cr} (рис. 10, а), який шунтує резистор $R3$, що сприяє підвищенню коефіцієнта передачі на високих частотах. Результати дослідження частотної корекції для $GBW = 1E6$ та послідовності C_{cr} від 0 до $1E-10$ наведено на рис. 10, б. Встановлено, що оптимальне значення ємності коректувального конденсатора становить $C_{cr} = 7E-11$. Однак використання коректувального конденсатора не можна вважати ідеальним рішенням, адже така корекція неоднакова в усьому частотному діапазоні та повинна проводитися з відповідними застереженнями.

Четвертий розділ присвячено проблемі дослідження параметрів сигнальних перетворювачів імпедансної спектроскопії, в яких для структурного спрощення та розширення спектра частот використовуються негармонічні, переважно імпульсні сигнали у формі меандру. Заміна гармонічних моночастотних сигналів синусоїдальної форми на імпульсні сигнали дає змогу відмовитися від використання перестроюваних за частотою задавальних генераторів функції синуса, які зазвичай реалізуються на основі високопрецизійних цифро-аналогових перетворювачів та згладжувальних фільтрів. Розв'язуючи задачу аналізу точності функціонування сигнального перетворювача імпедансу для встановлених характеристичних частот, сформуємо та порівняємо чотири масиви інформативних сигналів активного та реактивного імпедансу. Перший масив $M1$ отримуємо, використовуючи АС малосигнальний аналіз, який відповідає ідеалізованому варіанту сигнального перетворення та надалі буде використовуватися в якості опорного. Другий масив $M2$ отримуємо методом Transient аналізу, використовуючи вихідні сигнали $SD(V(4))$, $SD(V(6))$ при типовій активації гармонічним (синусоїдальним) коливанням. Третій масив $M3$ отримуємо аналогічно, методом Transient аналізу з використанням імпульсного джерела. Відмінність у схемі перетворювача для отримання другого

та третього масивів зводиться лише до відповідної заміни джерела задавального сигналу V1. Четвертий масив M4 отримуємо, вводячи в сигнал активації набір вищих, а для імпульсного сигналу - непарних, частот $3f$, $5f$, $7f$ і т.д. Відповідно до розробленої нами методики, корекція результатів вимірювання здійснюється за формулами:

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

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

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

За результатами моделювання встановлено, що з метою певного спрощення, яке не критично впливає на точність корекції:

- кількість гармонік може бути обмежена лише першими значеннями ряду, зокрема Н3, Н5, Н7, Н9;
- частоти гармонік kf , на яких вимірюються значення $\operatorname{Re} Z_{PLS}(kf)$, $\operatorname{Im} Z_{PLS}(kf)$, можуть закруглятися до частот, на яких вимірюються значення діаграми Найквіста $\operatorname{Re} Z_{PLS}(f)$, $\operatorname{Im} Z_{PLS}(f)$;
- для заданої схеми сигнального перетворювача коефіцієнти корекції $K_{RE}(k)$, $K_{IM}(k)$ можуть визначатися лише для граничних варіантів досліджуваних двополосників, зокрема, у варіанті лише активного $\operatorname{Re}_A (C = 0)$ та лише реактивного $\operatorname{Im}_R (R = 0)$ імпедансів.

Досліджено розширення функціональності вимірювального перетворення імпедансу з використанням методу чотиритактного інтегрування сигналу, в якому формування інформативних сигналів здійснюється напругами V_{Q1} , V_{Q2} , V_{Q3} та V_{Q4} , кожна з яких відповідає результату інтегрування у відповідних чотирьох тактах (чверть-періодах) сигналу активації (рис. 11, а).

Знакові функції – $A_{Q1}(t)$, $A_{Q2}(t)$, $A_{Q3}(t)$, $A_{Q4}(t)$, які визначають ці сигнали, приймають значення 1 в інтервалах часу:

$$A_{Q1}(t) = 1 @ t = [0 \dots \pi/2]; \quad A_{Q2}(t) = 1 @ t = [\pi/2 \dots \pi];$$

$$A_{Q3}(t) = 1 @ t = [\pi \dots 3\pi/2]; \quad A_{Q4}(t) = 1 @ t = [3\pi/2 \dots 2\pi].$$

В інші інтервали часу ці знакові функції приймають значення 0.

Інформативні сигнали (рис. 11, б), зокрема, напруги активної V_{RE} та реактивної V_{IM} складових формують операціями додавання та віднімання числових значень вищезгаданих чотирьох напруг:

$$V_{RE} = V_{Q1} + V_{Q2} - V_{Q3} - V_{Q4}; \quad V_{IM} = V_{Q1} - V_{Q2} - V_{Q3} + V_{Q4}.$$

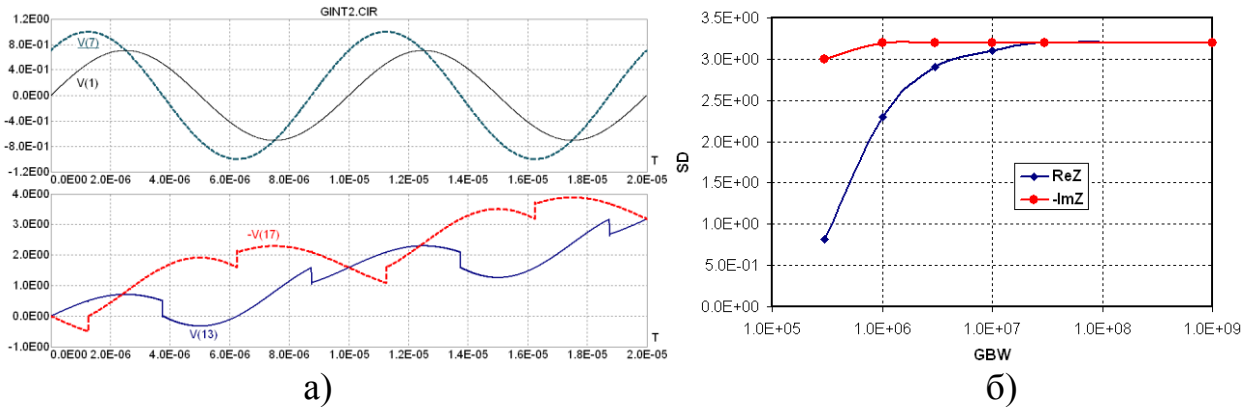


Рис. 11. Епюри напруг СПІ з чотиритактним інтегруванням сигналу

Такий спосіб сигнального перетворення має актуальність, принаймні, в двох задачах. Першою з них є реалізація тестових методів підвищення точності вимірювання, в ході яких формують сигнали з іншими комбінаціями напруг V_{Q1} , V_{Q2} , V_{Q3} та V_{Q4} . Це, в свою чергу, дозволяє реалізувати принцип надлишковості сигналів, використовуючи який представляється можливим проводити перевірку калібрування сигнальних трактів та компенсацію їх дрейфу нуля. Другою задачею, більш детально мова про яку піде далі, є безпосереднє інтегрування інформативного струму через досліджуваний двополісник в перетворювачах потенціостатичного типу.

Таке безпосереднє інтегрування струму дозволяє суттєво спростити схему реалізацію перетворювача та процес його подальшого калібрування. Представляється можливим реалізувати весь сигнальний тракт вимірювача імпедансу на єдиному інтеграторі без використання інших вузлів перетворювача. Схема такого перетворювача містить лише один операційний підсилювач та один конденсатор (рис. 12, а).

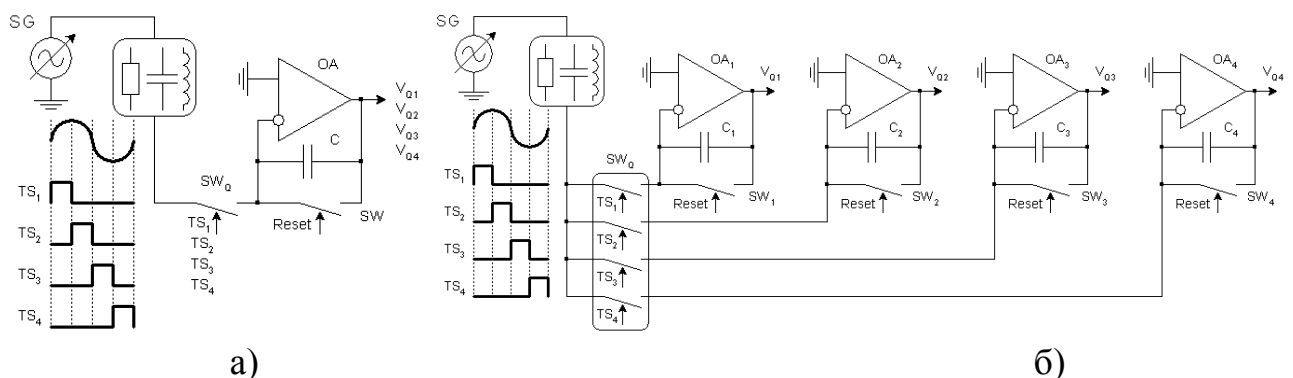


Рис. 12. Схема та керуючі сигнали вимірювального перетворення з чотиритактним послідовним (а) та з паралельним інтегруванням (б)

Інформативні сигнали – вихідні напруги V_{Q1} , V_{Q2} , V_{Q3} та V_{Q4} - формують послідовно, відповідним набором імпульсів керування – TS_1 , TS_2 , TS_3 та TS_4 :

$$V_{Q1} = K_Q \int_0^{\pi/2} I_Z(t) dt, \quad V_{Q2} = K_Q \int_{\pi/2}^{\pi} I_Z(t) dt,$$

$$V_{\Omega_1} = K_{\Omega} \int_{\pi}^{3\pi/2} I_Z(t) dt, \quad V_{\Omega_2} = K_{\Omega} \int_{3\pi/2}^{2\pi} I_Z(t) dt.$$

Встановлено, що при необхідності, зокрема при високих вимогах щодо швидкодії сигнального перетворення чотиритактне інтегрування можна проводити чотирма схемами з паралельним інтегруванням (рис.12, б)

В п'ятому розділі проведено оцінювання методичних похибок цифрової апроксимації гармонічних сигналів сигнальних перетворювачів. Серед відомих методів апроксимації гармонічних сигналів завдяки простоті реалізації найпоширенішими стали два різновиди сходиноквої апроксимації: рівномірна в часі та рівномірна за рівнем. За рівномірної за рівнем сходиноквої апроксимації гармонічного сигналу з числом рівнів n для кожної із івхвиль тривалість кожної сходинокви є різною. Координату початку $(i+1)$ -ї сходинокви можна розрахувати за виразом: $\alpha_{i+1} = \arcsin\left(\frac{i}{n} + \frac{1}{2n}\right)$.

Синтезований за цим методом сигнал, крім основної, містить всі непарні гармоніки, починаючи з третьої. Хоча амплітуди гармонік зменшуються пропорційно $1/k$ (k -номер гармоніки), на частотах, близьких до основної, їх рівень є доволі значним, що ускладнює оброблення сигналів у засобах вимірювання імітансу, зокрема реалізацію квадратурного розділення.

Встановлено, що достовірність результатів перевірки визначається рівномірною в часі сходиноквою апроксимацією гармонічного сигналу в процесі якої використовують d кроків на період, тоді спектр інформаційного сигналу, крім основної $\omega_0 = 2\pi f_0$, містить вищі гармоніки, найближчими із яких до основної є гармоніки із номерами $(d \pm 1)$.

Напруга отримана шляхом апроксимації гармонічного сигналу $U_{ca}(t)$ із врахуванням похибок гармонік описується виразом:

$$U_{ca}(t) = U_m \frac{\sin\left(\frac{\pi}{d}\right)}{\frac{\pi}{d}} \left\{ \sin\left(\omega_0 t - \frac{\pi}{d}\right) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{kd \pm 1} \sin\left[\left(kd \pm 1\right)\omega_0 t \pm \frac{\pi}{d}\right] \right\},$$

де $v = kd \pm 1$ - номер гармоніки, причому $k=1,2,3,\dots$

Оскільки корисним сигналом є основна гармоніка, то, порівнюючи вираз сигналу $U_{ca}(t)$ із ідеальною реалізацією $U_{id}(t) = U_m \sin \omega_0 t$, можна говорити про амплітудну $-\delta_0^{ca}$ та фазову похибки $-\psi_0^{ca}$ відтворення синусоїдного сигналу:

$$\delta_0^{ca} = \frac{d}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{d}\right) - 1 \quad \text{та} \quad \Delta\psi_0^{ca} = -\frac{\pi}{d}$$

При 128 рівнях апроксимації амплітудними спотвореннями основної гармоніки можна знехтувати в зв'язку з несуттєвим значенням її величини, а тому основним джерелом похибок залишається детермінований фазовий зсув основної гармоніки.

Вплив згаданих похибок послаблюється із збільшенням числа кроків апроксимації d на період. табл. 1).

Таблиця 1

Амплітудна (δ_0^{ca}) і фазова ($\Delta\psi_0^{ca}$) похибки відтворення основної гармоніки

Похибки	Кількість кроків апроксимації					
	4	8	16	32	64	128
δ_0^{ca} , %	9,8	2,4	0,63	0,14	0,03	0,01
$\Delta\psi_0^{ca}$, град	42	22	11	5,2	2,6	1,5

Статичні похибки пов'язані із відхиленням реальної характеристики перетворення від номінальної. Функцію цифро-аналогового перетворення можна подати у вигляді:

$$U(N_i) = 2^b (q - \Delta q) \sum_{n=0}^{b-1} a_n K_n,$$

де $K_n = 2^{m-1} / 2^b$ номінальні вагові коефіцієнти кодокеруваного подільника, N_i - цифрове значення i - ої комбінації.

Допускаючи суперпозиційний характер статичних похибок, тобто незалежність похибок у $(i+1)$ -й точці характеристики перетворення від числового значення коду N_i у попередній точці, реальну функцію перетворення можна подати у вигляді:

$$U(N_i) = 2^b (q - \Delta q) \sum_{n=0}^{b-1} a_n (K_n + \Delta K_n) + \Delta_0,$$

де Δq - похибка коефіцієнта перетворення, яка визначається похибками джерела опорної напруги, коефіцієнта передачі вихідного підсилювача та іншими факторами; Δ_0 - похибка від зміщення нуля; ΔK_n - похибки вагових коефіцієнтів.

Нехтуючи добутком $\Delta q_n \Delta K_n$, як величиною вищого порядку малості, вираз, що описує абсолютну похибку реального ЦАП у N_i -й точці ХП, має вигляд:

$$U(N_i) = \Delta_0 + \Delta q N_i + 2^b q \sum_{n=0}^{b-1} a_n \Delta K_n,$$

Структура цього виразу показує наявність трьох характерних складових похибок перетворення: адитивної, мультиплікативної та похибки від нелінійності. Вплив перших двох складових похибок усувають у процесі налагодження перетворювача, відповідно, коригуванням нуля та калібруванням. Після проведення таких операцій початок і кінець реальної функції перетворення збігається із номінальною, внаслідок чого функцію перетворення можна подати у вигляді:

$$U(N_i) = \Delta q N_i + 2^b q \sum_{n=0}^{b-1} a_n \Delta K_n$$

Отже, на вихідні характеристики джерела сигналів гармонічної напруги впливає лише нелінійність його характеристики перетворення. Для визначення похибок вихідної напруги перетворювача зумовлених нелінійністю характеристики, застосовують диференційний метод. Напруга на виході досліджуваного перетворювача $U_{дп}$ після коригування нуля і калібрування

описується рівнянням. Якщо нелінійністю опорного перетворювача можна знехтувати, тобто $U_{оп}(N_i) = qN_i$, то вихідну напругу різницевого операційного підсилювача визначає не лише кількісну оцінку, а може бути використана для розрахунку впливу нелінійності на точність формування гармонічних напруг:

$$\Delta U(N_i) = U_{дп} - U_{оп} = 2^b q \sum_{n=0}^{b-1} a_n \Delta K_n$$

Встановлено, що випадкова складова відхилення амплітуд імпульсів від середніх значень визначатиме склад та характер високочастотних гармонік, а тому її вплив на формування гармонічних напруг послаблюється як через інерційність елементів вимірювального каналу, так і у процесі оброблення, коли час вимірювання займає кілька періодів зондувального сигналу. У табл. 2 наведено вимоги до цих параметрів на різних частотах зондувального сигналу.

Таблиця 2

Вимоги до динамічних характеристик перетворювача та буферного підсилювача

Частотні параметри	Робоча частота f_0 , МГц			
	$f_0 = 0,1$	$f_0 = 0,2$	$f_0 = 0,5$	$f_0 = 1$
Час встановлення кроку апроксимації $t_{есм}$, нс	250	125	50	25
Частота буферизації $f_{бф}$, МГц	5,0	10,0	25,0	50,0

Проведеними дослідженнями виявлено, що вибір часу встановлення залежить не лише від робочої частоти, але і від числа кроків апроксимації на період (табл.3).

Таблиця 3

Вимоги до часу встановлення $t_{есм}$ перетворювача за відповідно до робочої частоти f_0 (МГц) та кількості кроків апроксимації d

d	$t_{есм}$, нс			
	$f_0 = 0,1$	$f_0 = 0,2$	$f_0 = 0,5$	$f_0 = 1$
512	51	24	9	4
256	78	38	15	7
128	140	70	28	14
64	240	120	48	24
32	418	208	82	42

В шостому розділі приведено розроблені схемотехнічні рішення конвертерів імпедансу сигнальних перетворювачів для оптичних сенсорів, з високою селективністю інформативного сигналу та ефективним послабленням паразитних складових сигналів від сторонніх джерел світла та електромагнітних завад. На основі методів синхронного півперіодичного детектування реалізовано частотно-селективні схеми сигнальних перетворювачів для оптичних сенсорів з послабленням паразитних складових сигналів від сторонніх джерел сигналів. Які побудовані на основі операційного підсилювача з граничною частотою 10МГц та

ефективним послабленням завод і більше 10^4 від частоти інформативного сигналу. Реалізацію сигнального перетворювача проведено з використанням попереднього підсилювача напруги згідно рис. 13, а, а його вихідні параметри перетворювача представлено на рис.13, б.

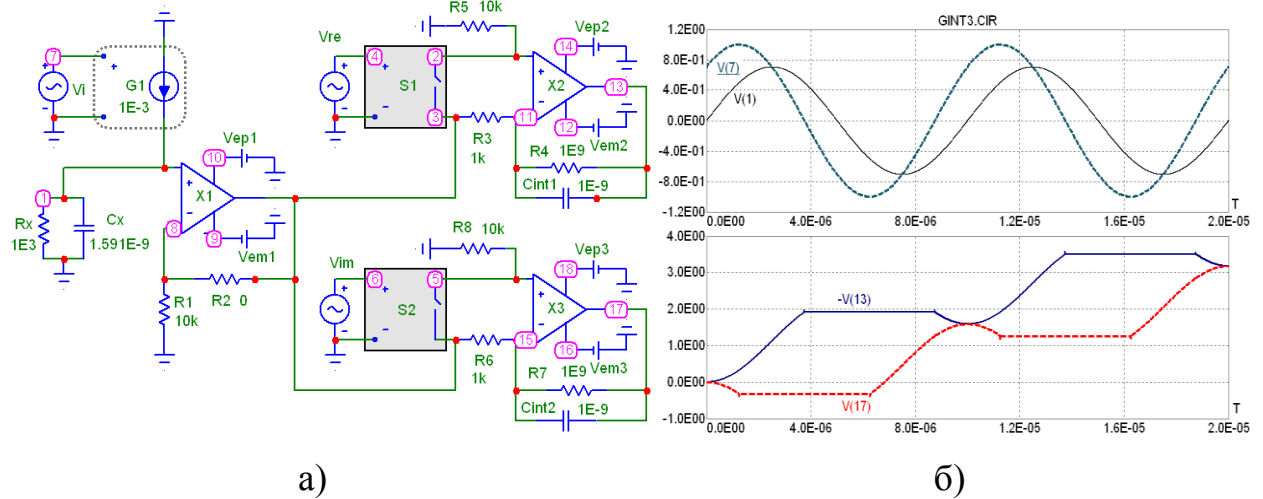
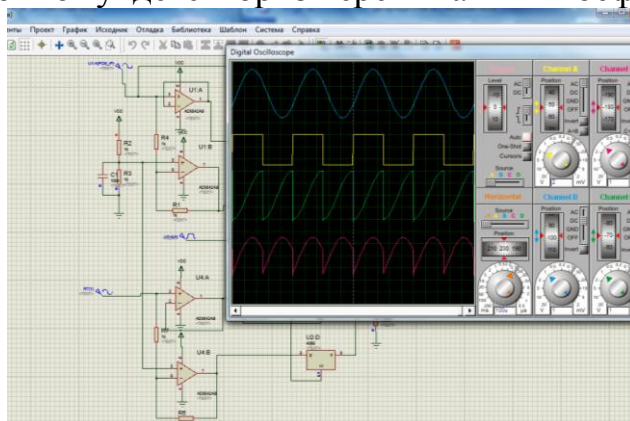


Рис. 13. Схема модифікованого вимірювального перетворювача імпедансу (а) та епюри вихідних сигналів (б) для прямокутних сигналів

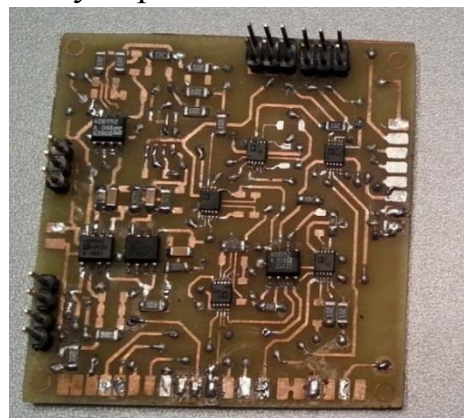
Для перевірки функціонування перетворювача використано програмний пакет Proteus, вбудований симулятор якого дозволив отримати часові залежності вихідних значень активної ReZ та реактивної ImZ складових імпедансу з допомогою віртуальних інструментів в режимі реального часу. Зображення вхідних і вихідних сигналів та епюр вихідних сигналів розробленого СПІ для оптичних сенсорів представлено на рис.14.

Розроблено заводостійкий сигнальний перетворювач імпедансу для оптичних сенсорів неінвазивної медицини, які дозволяють здійснювати дослідження біомедичних параметрів шляхом комплексного аналізу імпедансу на частотах 0.1-12 Гц при активації оптичним випромінюванням інфрачервоного діапазону в межах 950- 1500 нм.

Перетворювач реалізовано на основі модифікованої схеми, в якій напівперіодне квадратурне детектування та інтегрування сигналу базується на синхронному детекторі з перемиканням коефіцієнту передачі.



а)



б)

Рис.14. Епюри сигналів розробленого СПІ (а) та його зовнішній вигляд (б)

Проведена нами структурно-параметрична модифікація СПІ для оптичних сенсорів а активацією періодичними сигналами представлена на рис. 15, а, а результати модельних досліджень на рис. 15, б.

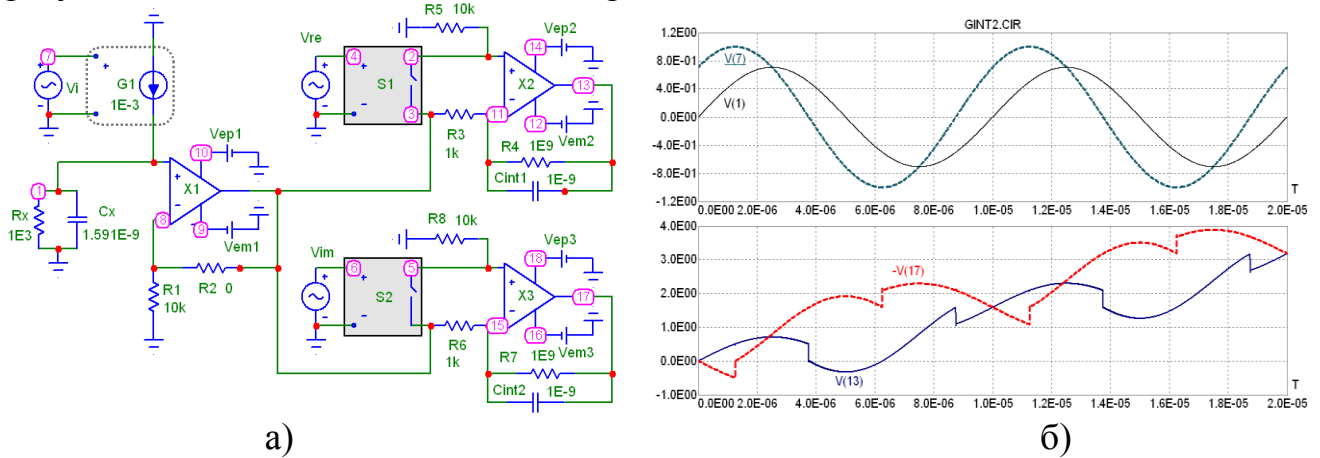


Рис. 15. Схема модифікованого вимірювального перетворювача імпедансу оптичного сенсора для медичних досліджень (а) та епюри вихідних сигналів (б)

Розроблені СПІ використано в процесі побудови неінвазивного сенсора контролю параметрів біомедичних матеріалів на основі мікроконтролера PSoC, структурна схема та зовнішній вигляд якої представлено на рис.16.

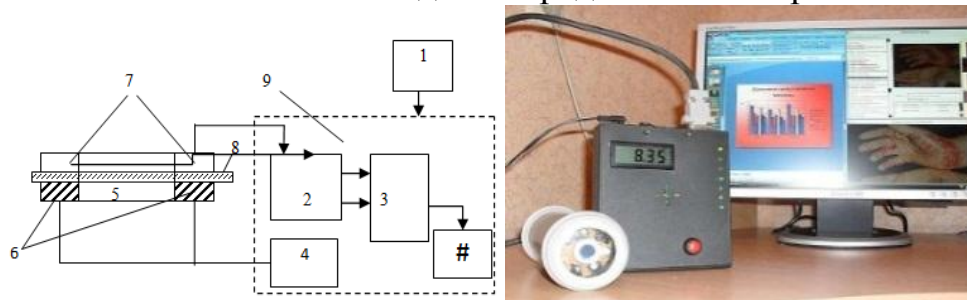


Рис. 16. Структурна схема пристрою дослідження параметрів біоматеріалів та його зовнішній вигляд

Його реалізацію проведено на основі мікроконтролера сімейства PSoC типу CY8C24X94 і складається з наступних блоків: блок живлення (1), підсилювач(2), синхродетектор (3), драйвер світло діода(4), досліджуваний взірець (5), світлодіоди (6), фотоперетворювач (7), лінза(8), вимірювального блоку(9), дисплея(#). Для визначення імпедансних характеристик використовується оптичний метод, який ґрунтується на аналізі зміни параметрів оптичного потоку від впливу досліджуваного середовища та реєструється за допомогою фотоелектронного перетворювача. На основі отриманих результатів формуються відповідні біологічні параметри, значення яких відображається на дисплеї. Графічні залежності отриманих результатів для трьох значень частот представлені на рис. 17.

Для дослідження провідності органічних напівпровідникових матеріалів використані спеціальні моделі типу елемента Варбурга, які описують їх внутрішню будову, для частотного діапазону 0,01Гц - 100 кГц та реалізовано структури оптичних сенсорів імпедансного типу та інформаційно-вимірювальних

систем на основі сучасної мікропроцесорної систем ADuC 834, з інтегрованими каналами передачі даних для комп'ютерного аналізу результатів вимірювань.

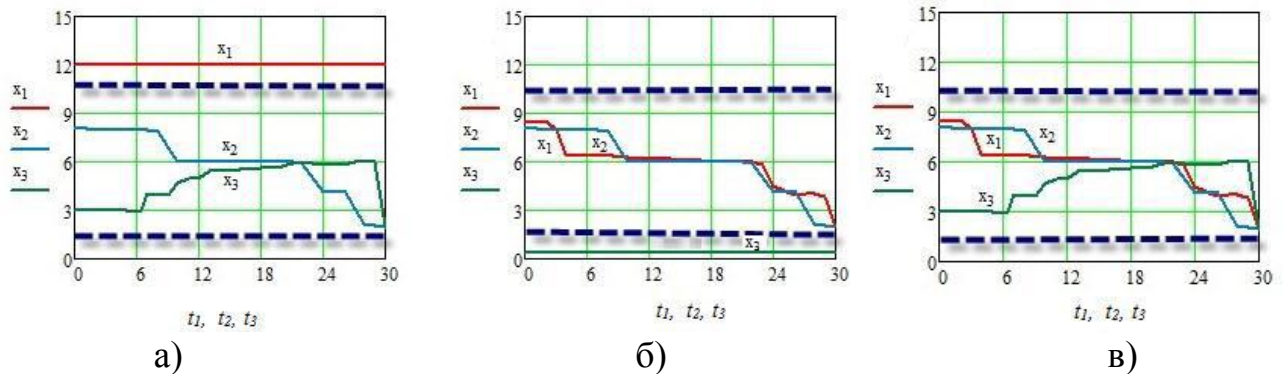


Рис. 17. Графічні залежності імпедансу фотоперетворювача: а) в режимі перевищення допустимих параметрів; б) в режимі вимірювання імпедансу двох частот; в) в режимі вимірювання трьох частот

Структурна схема вимірювальної системи зображена на рис. 18а, призначення елементів аналогічно наведеним на рис. 6.

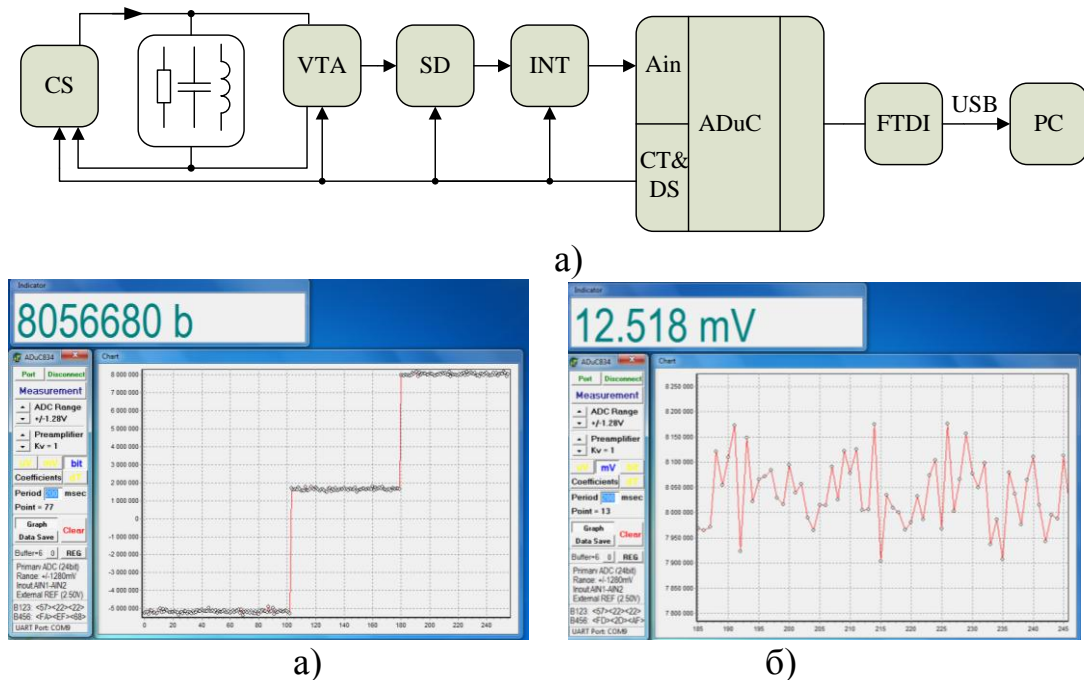


Рис. 18. Епюри динамічного діапазону (а) та рівень власного шуму (б) СПІ

Апаратна частина складається з джерела струму, який формує активуючий сигнал в межах від 0 до 30 мА, сигнального перетворювача та блоку управління. Керування інформаційно-вимірювальною системою здійснюється мікроконтролером ADuC 834, який забезпечує обмін інформацією з ПК для подальшого програмного аналізу та візуалізації результатів вимірювання. Зображення інтерфейсу користувача використаного програмного забезпечення в режимі калібрування аналого – цифрового перетворювача представлено на рис. 18б. Відповідні осцилограми вихідних сигналів СПІ в процесі вимірювання

представлено на рис. 19: а) вхідний сигнал, б) реактивна складова, в) активна складова імпедансу.

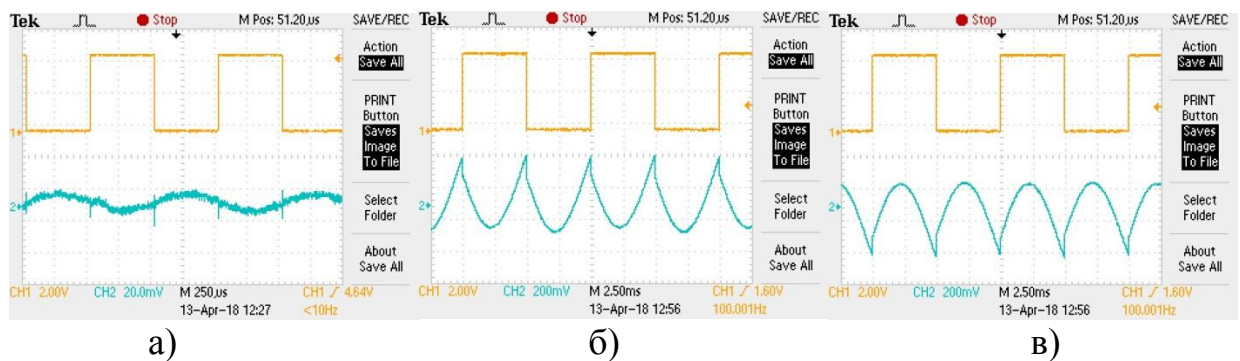


Рис. 19. Осцилограми сигналів при дослідженні органічних матеріалів: вхідний сигнал (а), реактивна складова імпедансу(б), активна складова імпедансу (в)

З допомогою розробленої системи проведено дослідження органічної напівпровідникової гетероструктури на основі плівки THCA (Sigma Aldrich ltd.) та TCz1, які нанесені на скляні підкладки (при кімнатній температурі) з прозорим провідним покриттям ITO ($R=40 \text{ Ом}$) та катодним електрод (Ca/Al). На рис. 20 представлено еквівалентну схему досліджуваної гетероструктури рис. 20, а та визначену її спектральні характеристики імпедансу відображені за допомогою діаграм найквіста рис. 20, б.

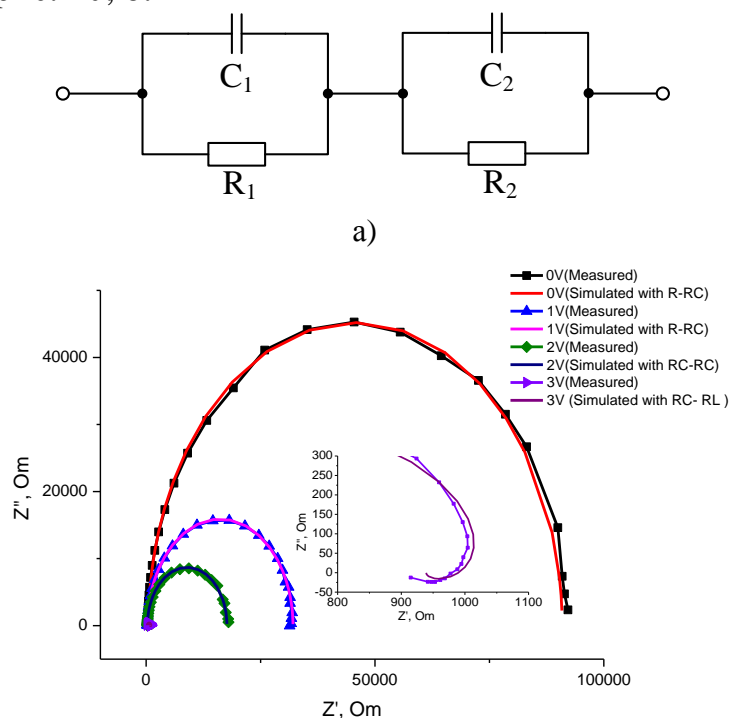


Рис. 20. Еквівалентна схема світловипромінюючої структури на основі ITO/THCA/TCz1/Ca/Al а) та відповідна діаграма Найквіста б)

Апаратна частина інформаційно вимірювальної системи складається СПІ на основі операційного підсилювача AD8544 і двохнапрвлених прецизійних аналогових ключів ADG736 рис. 21а та мікропроцесорного блоку на основі 24 – розрядного перетворювача ADuC 834 зображеного на рис. 21, б.

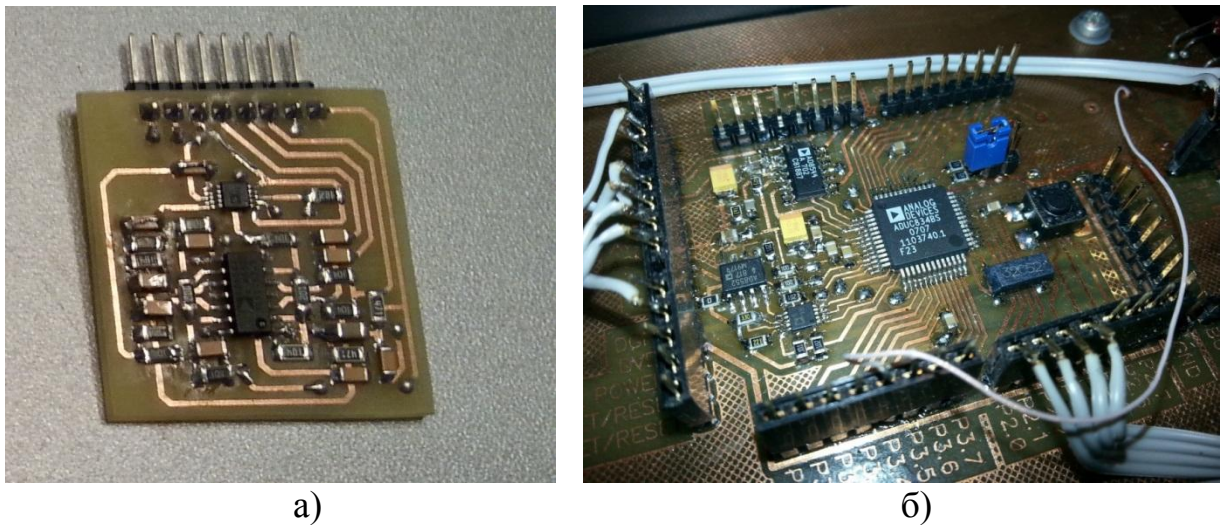


Рис. 21. Структурні елементи апартної частини інформаційно-вимірювальної системи вимірювальної системи: сигнальний перетворювач (а); мікропроцесорний блок (б)

Розроблена інформаційно-вимірювальна система дозволяє проводити вимірювання імпедансних характеристик матеріалів органічної електроніки та структур на її основі в межах від 10 Ом до 1 МОм в частотному діапазоні від 10 Гц – до 1 МГц з похибкою перетворення яка не перевищує 0,1 %.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. На основі виявлених закономірностей в процесі математичного моделювання мікроелектронних перетворювачів імпедансу проведено структурно-параметричну модифікацію та створено ряд нових структур сигнальних перетворювачів для сенсорних пристроїв на основі елементів твердотільної електроніки, які забезпечують вимірювання імпедансу від 10 Ом до 1МОм, в частотному діапазоні 0,01 Гц -1 МГц та похибкою вимірювання не більше 0,1%.
2. Встановлено, що для схематичного моделювання СПІ необхідно використовувати спеціалізовані програмні засоби, зокрема MicroCap, з вбудованим симулятором електронних схем з відкритим програмним кодом – SPICE, який дозволяє проводити імпедансний аналіз на основі готових моделей компонентів твердотільної електроніки, наданих їх виробниками та моделей функціональних джерел сигналів.
3. Показано, що в процесі моделювання вузлів сигнальних перетворювачів необхідно використовувати поєднання двох методів аналізу – Transient (для перехідних процесів) та AC (для АЧХ та ФЧХ). На основі даного підходу розроблено методику проведення досліджень, яка ґрунтується на порівнянні результатів отриманих з допомогою цих методів та визначенні коефіцієнтів кореляції, за якими проводиться кількісне оцінювання параметрів досліджуваних СПІ.

4. Встановлено, що для виділення інформаційного сигналу СПІ необхідно використовувати синхронне детектування та подальше інтегрування, при цьому активна складова вихідного сигналу детектується та інтегрується синфазно із задавальним вхідним сигналом, а реактивна складова – з фазовим зміщенням на $\pi/2$, що дає можливість спростити апаратну реалізацію перетворювача.
5. Для розширення функціональних можливостей модельних досліджень створено моделі, які описують складні функціональні залежності параметрів компонентів і досліджуваних двополосників, зокрема параметричної залежності ємності від прикладеної напруги та модуляції цієї ємності іншими параметрами, а також запропоновано нові підходи проведення аналізу на основі покрокової зміни (Stepping: Step all variables simultaneously або Step variables in nested loops) параметрів компонентів, амплітуди та фази сигналів, температури.
6. Встановлено механізм модуляції ємності двополосників із діодними структурами, який визначається шириною області просторового заряду p-n переходу (бар'єрна ємність) та дифузійними струмами (дифузійна ємність), який вимагає багатопараметричного представлення. Показано, що зміна постійної складової в джерелі гармонічної напруги від 0 В до 0,5 В призводить до зменшення модуля імпедансу діода від 140 dB до 60 dB.
7. Розроблено нову методику комплексного модельного параметричного дослідження СПІ, яка ґрунтується синхронному квадратурного детектуванні та інтегруванні вихідних напруг сигнального перетворювача відповідно до виразів:

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

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

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 двополоснику (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.

8. Встановлено, що для усунення впливу перехідного процесу спричиненого активуючими коливаннями, в гальваностатичному методі вимірювань, необхідно змістити активуючий сигнал на $\pi/2$ - для гармонічних сигналів або скоротити вдвічі тривалість першого імпульсу – для імпульсних сигналів.
9. Розроблено новий метод аналізу інформативного сигналу SPICE моделей сигнальних перетворювачів імпедансу, у відповідності до якого активна Z_{RE} та реактивна Z_{IM} складові імпедансу корегуються отриманими в ході

Transient аналізу коефіцієнтами $K_{CRE} = \frac{SDT_{RE}}{Z_{RE}}$, $K_{CIM} = \frac{SDT_{IM}}{Z_{IM}}$, які враховують реальні параметри елементів.

10. Встановлено залежність величини інформативної напруги від ширини смуги пропускання вхідних підсилювальних каскадів на операційному підсилювачі, зокрема показано що для сигналу частотою $f_0 = 0,1$ МГц необхідно забезпечити ширину смуги пропускання не менше $GBW = 10$ МГц, що вимагає використання двох ідентичних повторювачів для формування достатнього та від'ємного півперіоду сигналу для сигнальних перетворювачів гальваностатичного типу.
11. Розроблено методику для аналізу паразитного впливу вищих гармонік імпульсного сигналу на точність сигнального перетворення відповідно до якої корекція результатів вимірювання проводиться за формулами:

$$\begin{aligned} \text{Re} Z_{COR}(f) &= \text{Re} Z_{PLS}(f) - \sum_{k=3}^m K_{RE} \left(\text{Re} Z_{PLS}(kf) \right), \\ \text{Im} Z_{COR}(f) &= \text{Im} Z_{PLS}(f) - \sum_{k=3}^m K_{IM} \left(\text{Im} Z_{PLS}(kf) \right), \end{aligned}$$

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_{IM} – 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.

12. Встановлено, що використання чотиритактного інтегрування інформаційного сигналу, дозволяє реалізувати принцип надлишковості сигналів, який забезпечує перевірку калібрування сигнальних трактів та компенсацію їх дрейфу нуля. Інтегрування проводилося на протязі двох періодів. Підтвердженням результативності методу чотиритактного інтегрування та алгоритму розрахунку інформативних сигналів є рівність напруг $V_{RE} = V_{IM}$ наприкінці кожного з періодів сигналу активації двополюсника, характерна частота якого f_0 співпадає з частотою сигналу активації. Така рівність має місце при $GBW = 1E12$, тобто, без врахування частотних характеристик операційних підсилювачів. Такий підхід особливо актуальний для реалізації сенсорних пристроїв з використанням багато розрядних АЦП в процесі програмного аналізу інформаційного сигналу.
13. 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.

14. Вперше виявлено, що фазовий зсув на вибраній частоті вимірювання, зумовлений інерційністю елементів, що беруть участь у цифровому синтезі гармонічних напруг, є сталим, тому його вплив можна компенсувати. Похибки відтворення амплітуди основної гармоніки на заданій частоті мають мультиплікативний характер, і в принципі їх вплив можна усунути калібруванням вимірювального каналу.
15. Розвинено теоретичні основи побудови широкого СПІ на основі мікропотужних операційних підсилювачів та швидкодіючих аналогових комутаторів. Встановлено залежності амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик від смуги пропускання операційних підсилювачів. Показано, що перевагою розроблених конвертерів імпедансу є висока завадостійкість з відношенням сигнал-шум понад 85 дБ.
20. Теоретично та експериментально доведено, що функція перетворення імпедансу розробленого конвертера другого порядку (на операційному підсилювачі з граничною частотою 1 МГц) залежить від смуги пропускання операційного підсилювача. Встановлено послаблення рівня інформаційного сигналу на верхній частоті зрізу більш як на 20 дБ.
16. Для візуалізації ближнього ІЧ випромінювання в діапазоні 650-950 нм розроблено гібридний(органічно-неорганічний) пристрій, функціонування якого ґрунтується на встановленні кореляції значень імпедансу органічного фотоперетворювача від інтенсивності ІЧ сигналу.
17. Запропоновано та реалізовано СПІ як структурний елемент інформаційно-вимірювальної системи на основі контролера PSoC для дослідження інжекційних процесів нанорозмірних органічних шарів в області випромінювання світлодіодних структур на основі імпедансних характеристик в діапазоні 0,1-1 МГц.
18. На основі створених СПІ розроблено сенсор визначення водневого показника середовища (з оптичним відгуком) в діапазоні 2-12 рН, принцип роботи якого базується на визначенні функціональної залежності значення водневого середовища від значення імпедансу фотоперетворювача.

ОСНОВНІ РОБОТИ, ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія:

1. **Барило Г.І.** Сигнальні перетворювачі мікроелектронних сенсорів імпедансного типу / [Г.І. Барило, Р.Л. Голяка, З.Ю. Готра] : За редакцією проф. З.Ю. Готри. – Львів: Видавництво «Ліга - Прес», 2017. – 185 с. (Монографія). *(Особистий внесок здобувача: аналіз сучасного стану сенсорних пристроїв на основі перетворювачів імпедансу, моделювання, дослідження параметрів структурних елементів перетворювачів, наукове обґрунтування отриманих результатів).*

Навчальний посібник:

2. **Барило Г.І.** Системний аналіз та експертні системи: / [Г.І. Барило, Ю.Я. Бобало, З.Ю. Готра, О.З. Готра, М.М. Климаш, В.В. Лесінський, Л.Ф. Політанський] Навчальний посібник: За ред. Готри З.Ю. – Чернівці, Чернівецький нац. ун-т: 2017. – 408 с. – ISBN 978-966-423-421-1. *(Особистий внесок здобувача: представлено методи моделювання сигнальних перетворювачів у процесі проектування електронних пристроїв).*

Публікації у наукових фахових виданнях України:

3. **Барило Г.І.** SPICE модель квадратурного синхронного детектора вимірювальних перетворювачів імпедансу / **Г.І. Барило**, В.В. Вірт, Р.Л. Голяка, З.Ю. Готра // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації : збірник наукових праць. – 2016. – № 849. – С. 126–134. *(Особистий внесок здобувача: дослідження та побудова моделі квадратурного синхронного детектора для перетворювача імпедансу).*

4. **Барило Г.І.** Методика підвищення точності вимірювального перетворення в імпедансній спектроскопії з врахуванням негармонічності сигналів / Г.І. Барило, В.В. Вірт, Ф.Ф. Везир, Р.Л. Голяка, З.Ю. Готра, Г.Л. Кучмій // Матеріали сімнадцятої міжнародної науково-технічної конференції. Міжнародний науково-технічний журнал. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. – 2017. – №2 (58). – С. 73-75. – ISSN: 2219-9365. *(Особистий внесок здобувача: розроблення моделі перетворювача).*

5. **Барило Г.І.** Методика підвищення точності вимірювальних перетворювачів імпедансу з врахуванням негармонічності сигналів / Г.І. Барило, Р.Л. Голяка, І.Н. Прудіус, С.Є. Фабіровський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2017. – № 70. *(Особистий внесок здобувача: модельні дослідження).*

6. **Barylo Grygoriy.** Method of analysis errors of measuring conversion of impedance spectroscopy with activation nonharmonic signals / Grygoriy Barylo, Roman Holyaka, Volodymyr Virt, Fedir Vezyr // Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. – 2017. – №2 (86). – P. 108-116. – ISSN 1727-7108 *(Особистий внесок здобувача: модельні дослідження).*

7. **Barylo G.I.** Parametric analysis of synchronous detector devices of impedance spectroscopy / G.I. Barylo, R.L.Holyaka, V.V. Virt, F.F. Vezyr // Харьковський національний університет радіоелектроніки. Научно-технический журнал «Прикладная радиоэлектроника». – Том 16. – № 1, 2. – 2017. – с. 41-45. *(Особистий внесок здобувача: модельні дослідження синхронного детектора).*

8. **Барило Г.І.** Інформаційна оптико-електронна система підтримки прийняття рішень щодо ефективності лікувальної процедури / **Г.І. Барило**, А.Н. Зазуляк, О.Т. Кожухар, Н.І. Кус // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія "Інформатика та моделювання": зб. наук. пр. / Харківський політехнічний інститут. – № 38. – 2012. – С. 9-13. – ISSN 2079-0031. *(Особистий внесок здобувача: розроблення сигнального перетворювача оптико-електронного сенсора)..*

9. **Барило Г.И.** Исследование оптико-электронных систем на основе некогерентных излучателей для высокотемпературной коагуляции в хирургии / **Г.И. Барило**, М.С. Ивах, А.Т. Кожухар, Н.И. Кус, М.М. Гасяк // Биомедицинская инженерия и электроника. – № 2. – 2012. – 5 с. *(Особистий внесок здобувача: розроблення сигнального перетворювача для оптико-електронної системи високотемпературної коагуляції).*

10. **Барило Г.И.** Электронные системы для светолечения отозаболеваний / **Г.И. Барило**, А.М. Зазуляк, А.Т. Кожухар, Х.Б. Иванюк, М.М. Шуфан // Биомедицинская инженерия и электроника. – № 2. – 2012. – 5 с. *(Особистий внесок здобувача: розроблення сигнального перетворювача імпедансу для оптичної системи).*

11. **Барило Г.І.** Апаратурно-програмне забезпечення лікувального процесу в оториноларингології з неперевним оптико-електронним тестуванням біооб'єкта / **Г.І. Барило**, З.Ю. Готра, А.М. Зазуляк, О.О. Кіцера, Н.І. Кус // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – №2(24). – 2012. – С. 81-85. – ISSN 1681-7893 *(Особистий внесок здобувача: розроблення сигнального перетворювача імпедансу для оптичної системи тестування біооб'єкта).*

12. **Барило Г.І.** Температурний сенсор на основі селективного відбивання в рідких кристалах / З.М. Микитюк, А.В. Фечан, О.Є. Сушинський, **Г.І. Барило**, О.В. Бойко, Х.Б. Иванюк, П.М. Турик // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – №2(24). – 2012. – С.147-151. – ISSN 1681-7893 *(Особистий внесок здобувача: розроблення оптоелектронного перетворювача імпедансного типу).*

13. **Барило Г.І.** Розробка схемотехнічного рішення для автоматичного регулювання яскравості свічення органічних світлодіодів / Х.Б. Иванюк, З.Ю. Готра, П.Й. Стахіра, В.В. Черпак, Г.І. Барило, І.І. Гельжинський // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. “Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки. – № 6/12(66). – 2013. – С. 99-102. ISSN 1729-3774. *(Особистий внесок здобувача: розроблення сигнального перетворювача оптичної системи).*

14. **Барило Г.І.** Полімер-диспергований рідкокристалічний матеріал як активне середовище первинного перетворювача оптичного сенсора температури / З.Ю. Готра, А.В. Фечан, О.Є. Сушинський, Г.І. Барило, О.В. Бойко, М.В. Вісьтак, О.В. Чабан, Т.В. Пристай // Міжнародний науково-технічний журнал, Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – №2.(26). – 2013. – С. 131-135. – ISSN: 1681-7893. *(Особистий внесок здобувача: розроблення сигнального перетворювача оптичної системи).*

15. **Барило Г.І.** Схемотехнічні особливості побудови лікувально-діагностичних приладів на основі мікроконтролерів PSoC / Г.І. Барило, В.В. Вірт, З.Ю. Готра, М.С. Ивах, О.Т. Кожухар // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ" : Информатика і моделювання. – № 35 (1078), 2014. – С. 15-21. – ISSN: 2411-0558 *(Особистий внесок здобувача: схемотехнічна реалізація сигнального перетворювача оптичного блоку).*

Публікації у наукових періодичних виданнях інших держав, які входять до міжнародних наукометричних баз:

16. **Barylo G.** Circuit design for development of pH-sensors / P. Stakhira, V. Cherpak, **G. Barylo**, I. Kremer, N. Kus, O. Boiko // Proceedings of International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, (TCSET'2012), February 21-24, 2012, Lviv-Slavske, Ukraine. – P. 501-501. – ISBN: 978-1-4673-0283-8. *(Особистий внесок здобувача: дослідження сигнальних перетворювачів для рН сенсора).*

17. **Barylo G. I.** Stimulating Light System to Create a Controlled Effect Relaxation / **G.I. Barylo**, Gotra Z.Yu, A.M. Zazulyak, O.T. Kozhuhar, N.I. Kus // 2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – 2013. – P. 302-304. – DOI: 10.1109/ELNANO.2013.6552067. – ISBN: 978-1-4673-4672-6 *(Особистий внесок здобувача: дослідження сигнальних перетворювачів для оптичних медичних систем).*

18. **Barylo G.** Electro-Acoustic Effect in Organic Structure Based on Star-Shaped Carbazole Derivatives / Z. Hotra, D. Volyniuk, V. Cherpak, P. Stakhira, I. Grygorchak, J. V. Grazulevicius, A. Michaleviciute, A. Tomkeviciene, **G. Barylo**, N. Kus & M. Hladun // Molecular Crystals and Liquid Crystals, 589:1, 2014. – P. 67-73. – DOI: 10.1080/15421406.2013.871918. *(Особистий внесок здобувача: дослідження сигнальних перетворювачів для аналізу електроакустичного ефекту).*

19. **Barylo Grygoriy.** Three-terminal light-emitting device with adjustable emission color / Vladyslav Cherpak, Andrea Gassmann, Pavlo Stakhira, Dmytro Volyniuk, Juozas V. Grazulevicius, Asta Michaleviciute, Ausra Tomkeviciene, **Grygoriy Barylo**, Heinz von Seggern // Organic Electronics: physics, materials, applications, 15 (2014). – P. 1396–1400. – DOI: 10.1016/j.orgel.2014.04.002. *(Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень світловипромінювальних структур за допомогою сигнальних перетворювачів імпедансу).*

20. **Barylo G.** Electro-optic properties of exciplex-type organic electroluminescence devices depending on the technologies of active-layer preparation / Ivaniuk K., Chapran M., Cherpak V., **Barylo G.**, Stakhira P., Hotra Z., Hladun M. and Dudok T. // Ukrainian Journal of Physical Optics, Vol. 16, Issue 2, 2015, pp. 95 - 102. DOI: 10.3116/16091833/16/2/95/2015. *(Особистий внесок здобувача: дослідження електро-оптичних властивостей органічних матеріалів методом імпедансної спектроскопії).*

21. **Barylo Grygoriy.** Optoelectronic Multi-Sensor of SO₂ and NO₂ Gases / Zinoviy Mykytyuk, Andriy Fechan, Vasyl Petryshak, Grygoriy Barylo, Oksana Boyko // 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), 2016, pp. 402 - 405. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452070. ISBN: 978-6-1760-7807-4. *(Особистий внесок здобувача: розроблення сигнального перетворювача сенсора газу)*

22. **Barylo Hryhoriy.** Schematic Support of Programmed Polychromatic Treatments with the Preliminary Test for Colour Sensitivity / Zenon Hotra, Oleksandr Kozhukhar, Mariya Ivakh, **Hryhoriy Barylo**, Volodymyr Virt // 2016 13th International

Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), 2016, pp. 787 - 789. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452184. ISBN: 978-6-1760-7807-4. *(Особистий внесок здобувача: схемотехнічне рішення побудови імпедансного перетворювача поліхроматичного випромінювання).*

23. **Barylo G.** Detector-emitter system based on integrated organic vertical light emitting device and near-infrared organic photovoltaic cell / **G. Barylo**, V. Cherpak, G. Pakhomov, Z. Hotra, I. Helzhynskyy, M. Hladun, G. Wiosna-Salyga, B. Luszczynska & P. Stakhira // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 639:1, 2016, pp.177-185, DOI: 10.1080/15421406.2016.1255075. ISSN: 1542-1406. *(Особистий внесок здобувача: дослідження параметрів органічних структур методом імпедансної спектроскопії).*

24. **Barylo Hryhoriy I.** A device for conducting a dynamic modes of UIAB therapy with automatic process testing / **Hryhoriy I. Barylo**, Zenon Yu. Hotra, Oleksandr T. Kozhukhar, Mariya S. Ivakh, Wojciech Surtel, Marcin Maciejewski // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 10031, 2016, pp. 1 - 9, DOI: 10.1117/12.2249168. *(Особистий внесок здобувача: використання сигнального перетворювача в динамічних моделях).*

25. **Barylo Hryhoriy** Gas sensitive material on the basis of cholesteric-nematic mixture doped carbon nanotubes for optoelectronic NH₃ gas sensor / Vasyl S. Petryshak, Maria V. Vistak, Orest Y. Sushynkyi, Zinoviy M. Mikityuk, Hryhoriy I. Barylo, Maksat Kalimoldayev, Piotr Kisala, Azamat Annabaev // *Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017*, 104455C (August 7, 2017). – DOI:10.1117/12.2281015. *(Особистий внесок здобувача: використання сигнального перетворювача в динамічних моделях).*

26. **Barylo Hryhoriy.** The optoelectronic sensor creatinine and urea / Maria V. Vistak, Vasyl Ye. Dmytrakh, Ivan S. Diskovskyy, Lesya I. Kobylinska, Zinoviy M. Mikityuk, Vasyl S. Petryshak, **Hryhoriy I. Barylo**, Roman L. Holyaka, Yedilkhan Amirgaliyev, Wojciech Surtel, Róża Dzierzak // *Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017*, 104453Q (August 7, 2017). – DOI:10.1117/12.2280990. *(Особистий внесок здобувача: розроблення сигнального перетворювача для оптоелектронного сенсора).*

27. **Barylo Grygoriy.** Optical triglycerides biosensor on the base of cholesteric liquid crystals / Maria Vistak, Vasyl Dmytrah, Zinoviy Mykytyuk, Orest Sushynskyy, **Grygoriy Barylo**, Valentyn Prysiazhniuk, Yulia Horbenko // *2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*. – 2017. – P. 31-34. – DOI: 10.1109/AIACT.2017.8020058 – ISBN: 978-1-5386-0637-7 *(Особистий внесок здобувача: розроблення сигнального перетворювача для біосенсора)*

28. **Barylo Grygoriy.** Parametric analysis of impedance spectroscopy measuring transducers considering the non-harmonic signals / **Barylo Grygoriy**, Holyaka Roman, Hotra Zenon, Virt Volodymyr, Vezyr Fedir, Vistak Maria // *2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*. –

2017. – P. 237-241. – DOI: 10.1109/AIACT.2017.8020109. – ISBN: 978-1-5386-0637-7 (*Особистий внесок здобувача: дослідження імпедансних перетворювачів для негармонічних сигналів*)

29. **Barylo Grygoriy.** Method of Analysis Errors of Measurement Conversion of Impedance Spectroscopy with Activation Nonharmonic Signals / **G. Barylo**, R. Holyaka, Z. Hotra, M. Vistak, V. Virt, F. Vezyr // NAP-2017, 2017 IEEE 7th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties (NAP). – 2017. – P. 04NESP04-1 - 04NESP04-5. – ISBN: 978-1-5386-2810-2. (*Особистий внесок здобувача : дослідження методів аналізу похибок перетворювачів імпедансу для негармонічних сигналів*)

30. **Barylo Grygoriy.** Liquid Crystals as an Active Medium of Enzymes Optical Sensors / M. Vistak, V. Dmytrah, R. Fafula, I. Diskovskyi, D. Halytsky, Z. Mykytyuk, O. Sushynskiy, **G. Barylo**, Y. Horbenko // NAP-2017, 2017 IEEE 7th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties (NAP). – 2017. – P. 04NB13-1 - 04NB13-4. – ISBN: 978-1-5386-2810-2. (*Особистий внесок здобувача: створення сигнальних перетворювачів імпедансу для оптичних сенсорів*)

31. **Barylo Grygoriy.** Parametric analysis of the input circles of measuring transducers of galvanostatic type impedance / Grygoriy Barylo; Roman Holyaka; Volodymyr Virt; Fedir Vezyr; Zenon Hotra // 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – 29 May-2 June 2017. – P. 1141-1144. – DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100428. – ISBN: 978-1-5090-3006-4. (*Особистий внесок здобувача: дослідження входних кіл перетворювачів імпедансу гальваностатичного типу*).

32. **Barylo G.** Parametric Analysis of Galvanostatic Type Impedance Measuring Front-end / Grygoriy Barylo, Roman Holyaka, Ivan Prudyus, Sergiy Fabirovskyy // 4th international scientific-practical conference problems of infocommunications-science and technology (PIC S&T). – Kharkiv, UKRAINE. – OCT 10-13, 2017. P. 323-326. – DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246407. ISBN: 978-1-5386-0983-5. (*Особистий внесок здобувача: здійснено параметричний аналіз перетворювачів імпедансу гальваностатичного типу*).

33. **Barylo G.** Parametric Analysis of Input Circuits of Galvanostatic Type Impedance Measuring Transducers / G. Barylo, Z. Mykytyuk, R. Holyaka, M. Vistak, V. Virt, F. Vezyr // Sensors & Transducers, Vol. 214, Issue 7, July 2017, – P. 64-68. – ISSN: 2306-8515 (*Особистий внесок здобувача: дослідження входних кіл перетворювачів імпедансу гальваностатичного типу*).

34. **Барило Г.І.** Методика модельних досліджень параметрів вимірювальних перетворювачів імпедансу / Г.І. Барило, В.В. Вірт, Р.Л. Голяка, З.Ю. Готра // 2016 IEEE Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (УкрМі- Ко'2016/UkrMiCo'2016) / Збірник матеріалів науково-технічної конференції. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2016. – С. 278–280. (*Особистий внесок здобувача: розроблено методику модельних досліджень параметрів перетворювачів імпедансу*).

Патенти України:

35. Патент України на корисну модель UA 104701 U, МПК: (2006.01) G01N 21/00. Пристрій неінвазивного неперервного контролю змін хімічного складу крові / **Г.І. Барило**, М.С. Івах, О.Т. Кожухар, З.Ю.Готра, В.В. Вірт, І.М. Чепак. – № и 2015 08651; заявл. 07.09.2015; опубл. 10.02.2016. Бюл. № 3. *(Особистий внесок здобувача: запропоновано спосіб виготовлення первинного перетворювача оптичного сенсора для контролю хімічного складу крові).*

36. Патент України на винахід UA 86967 C2, МПК: H01H 51/00, G01R 27/00. Комутатор сигналів низького рівня / **Г.І. Барило**, Р.В. Кочан, В.В. Кочан, О.В. Кочан. – № а200610833; заявл. 13.10.2006; опубл. 10.06.2009. Бюл. № 11. *(Особистий внесок здобувача: розроблено комутатор для сигнальних перетворювачів).*

Вибрані публікації у збірниках матеріалів та тез міжнародних та вітчизняних наукових конференціях:

37. **Hryhoriy Barylo**. Application of the principle of comparing in importance signals for multi-parameter diagnostic technology / Kozhukhar Oleksandr, Barylo Hryhoriy, Ivakh Mariya, Makara Ivanna, Virt Volodymyr // The XIIIth International Conference “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics” 24-27 February 2015, Polyana-Svalyava, Ukraine. – P. 134-136.

38. **Барило Г.І.** Застосування фотоінформаційних технологій в лікувальних засобах / В.В. Вірт, Г.І. Барило, М.С. Івах, О.Т. Кожухар // «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки»: Праці IV міжнарод. наук.-практ. конф. 26-29 травня 2015 р. – Чернівці: Видавничий дім «Родовід», 2015. – С. 169-171.

39. **Барило Г.І.** Енегroeфективний сигнальний перетворювач на основі синхронного детектора / Г.І. Барило, В.В. Вірт, Р.Л. Голяка, З.Ю. Готра, І.П. Кремер // Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки». Чернівці 21 – 24 травня, 2016. – С. 144-146.

40. **Барило Г.І.** Функціональна модель сигнального перетворювача для вимірювання імпедансу / Г.І. Барило, В.В. Вірт, Р.Л. Голяка, З.Ю. Готра // Vth International Scientific Practical Conference “Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems” 3–5 November 2016, Chernivtsi, Ukraine. – P. 183.

41. **Барило Г.І.** Параметрична оптимізація активних фільтрів другого порядку / Г.І. Барило, В.В. Вірт, Р.Л. Голяка, З.Ю. Готра, І.П. Кремер // Международная научная конференция MicroCAD - НТУ "ХПИ", 2016. – С. 20.

42. **Барило Г.І.** Методика підвищення точності вимірювального перетворення в імпедансній спектроскопії з врахуванням негармонічності сигналів / Г.І. Барило, В.В. Вірт, Ф.Ф. Везир, Р.Л. Голяка, З.Ю. Готра, Г.Л. Кучмій // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Матеріали XVII міжнар. наук.-техн. Конференції (8-13 червня 2017 р., м. Одеса); Одес. нац. акад. зв'язку ім. О.С. Попова. – Одеса – Хмельницький: ХНУ, 2017. – С. 72-73.

43. **Барило Г.І.** Parametric Analysis of Input Circles of Measuring Transducers Impedance of Potentiometric Type / Г.І. Барило, В.В. Вірт, Ф.Ф. Везир, Р.Л. Голяка // "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання" матеріали міжнародної

науково-практичної конференції. м. Івано-Франківськ, 15-20 травня 2017 року. – Івано-Франківськ: – 2017. – С. 311–314.

44. **Barylo Grygoriy.** Parametric analysis of impedance spectroscopy measuring transducers considering the non-harmonic signals / Barylo Grygoriy, Holyaka Roman, Hotra Zenon, Virt Volodymyr, Vezyr Fedir, Vistak Maria // 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT). – 2017. – P. 237-241.

45. **Barylo Grygoriy.** Method of Analysis Errors of Measurement Conversion of Impedance Spectroscopy with Activation Nonharmonic Signals / G. Barylo, R. Holyaka, Z. Hotra, M. Vistak, V. Virt, F. Vezyr // NAP-2017, 2017 IEEE 7th International Conference on Nanomaterials: (NAP). – 2017. – P. 04NESP04-1 - 4-5.

46. **Барило Г.І.** Вимірювальні перетворювачі імпедансу та їх модельні дослідження // Г.І. Барило, В.В. Вірт, М.В. Вісьтак, Ф.Ф. Везир, Р.Л. Голяка / Матеріали ІХ-ої Українсько-польської науково-практичної конференції "Електроніка та інформаційні технології" (ЕЛІТ-2017). 28–31 серпня 2017 р. Львів-Чинадієво, Україна. – С. 264-265.

47. **Barylo Grygoriy.** Parametric analysis of the input circles of measuring transducers of galvanostatic type impedance / Grygoriy Barylo; Roman Holyaka; Volodymyr Virt; Fedir Vezyr; Zenon Hotra // 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering – 29 May-2 June 2017. – P. 1141-1144

48. **Barylo G.** Parametric Analysis of Galvanostatic Type Impedance Measuring Front-end / Grygoriy Barylo, Roman Holyaka, Ivan Prudyus, Sergiy Fabirovskyy // 4th international scientific-practical conference problems of infocommunications-science and technology (PIC S&T). – Kharkiv, UKRAINE. – OCT 10-13, 2017. P. 323-326.

АНОТАЦІЯ

Барило Г.І. Структурно-параметрична модифікація мікроелектронних сигнальних перетворювачів імпедансу для сенсорної техніки.- На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – Твердотільна електроніка – Національний університет “Львівська політехніка”, Міністерство освіти і науки України, Львів, 2018.

Дисертація присвячена проблемі модифікації мікроелектронних сигнальних перетворювачів імпедансу та створення нового підкласу багаторозрядних високочутливих конверторів для сенсорів фізичних фелічин. У роботі теоретично обґрунтовано та реалізовано методи вимірювання імпедансу гальваностатичним та потенціостатичним способом з активуючими періодичними та неперіодичними сигналами. Проведено дослідження методів математичного аналізу сигнальних перетворювачів імпедансу та їхніх функціональних вузлів для підвищення точності перетворення з урахуванням фазочастотних параметрів активуючих джерел сигналів, температури, модуляції параметрів елементів, часової нестабільності амплітуди, фази а також впливу зовнішніх джерел сигналів та завад. Встановлено основні закономірності імпедансних характеристик з

активацією імпульсними та періодичними сигналами. Розроблено методики розрахунку величини імпедансу на основі математичного моделювання з урахуванням виявлених закономірностей.

Теоретично обґрунтовано та реалізовано методи побудови та математичні моделі сигнальних перетворювачів для оптичних сенсорів на основі фотоелектронних перетворювачів з періодичними прямокутними активуючими сигналами. Використання імпульсних активуючих сигналів у діапазоні 100Гц – 100кГц забезпечує вимірювання концентрації газів та газових сумішей на основі розроблених СПІ з точністю до 0,1%. Розроблено схемотехнічні рішення побудови та практично реалізовано сигнальні перетворювачі для оптичних сенсорів метану, чадного газу, вуглекислого газу, органічних тканин на основі холестеричних рідких кристалів, допованих наночастинками неорганічних матеріалів.

Теоретично обґрунтовано та реалізовано схемотехнічні методи побудови завадостійкого сигнального перетворювача імпедансу для оптичних сенсорів неінвазивної медицини, які уможлиблюють дослідження біомедичних параметрів шляхом комплексного аналізу імпедансу на частотах 0.1-12 Гц з активацією оптичним випромінюванням інфрачервоного діапазону в межах 950- 1500 нм.

Розроблено нові сенсорні пристрої для дослідження провідності органічних напівпровідникових матеріалів з використанням спеціалізованих моделей типу елемента Варбурга для частотного діапазону 0,01Гц - 100 кГц та реалізовано структури сигнальних перетворювачів імпедансного типу та інформаційно-вимірювальних систем на основі сучасних мікропроцесорних систем ADuC 841 та PSoC з інтегрованими каналами передачі даних для комп'ютерного аналізу. Отримані результати вимірювань підтверджують високу ефективність використання завадостійких сигнальних перетворювачів та відповідність параметрів цих перетворювачів результатам модельних досліджень.

Ключові слова: електричний імпеданс, імпедансна спектроскопія, імпедансні вимірювання, сигнальний перетворювач, діаграма Найквіста, SPICE модель.

АННОТАЦІЯ

Барыло Г.И. Структурно-параметрическая модификация микроэлектронных сигнальных преобразователей импеданса для сенсорной техники.- На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.01 - Твердотельная электроника - Национальный университет "Львовская политехника", Министерство образования и науки Украины, Львов, 2018.

Диссертация посвящена проблеме модификации микроэлектронных сигнальных преобразователей импеданса и создания нового подкласса многоразрядных высокочувствительных конверторов для сенсоров физических величин. В работе теоретически обоснованы и реализованы методы измерения

импеданса гальваностатическим и потенциостатическим способом с активирующими периодическими и непериодическими сигналами. Исследованы методы математического анализа сигнальных преобразователей импеданса и их функциональных узлов для повышения точности преобразования с учётом фазочастотных параметров активирующих источников сигналов, температуры, модуляции параметров элементов, временной нестабильности амплитуды, фазы, а также влияния внешних источников сигналов и помех. Установлены основные закономерности импедансных характеристик с активацией импульсными и периодическими сигналами. Разработаны методики расчета величины импеданса на основе математического моделирования с учетом выявленных закономерностей.

Теоретически обоснованы и реализованы методы построения и математические модели сигнальных преобразователей для оптических сенсоров на основе фотоэлектронных преобразователей с периодическими прямоугольными активирующими сигналами. Использование импульсных активирующих сигналов в диапазоне 100 Гц - 100 кГц обеспечивает измерение концентрации газов и газовых смесей на основе разработанных сигнальных преобразователей импеданса с точностью до 0,1%. Разработаны схемотехнические решения построения и практически реализованы сигнальные преобразователи для оптических сенсоров метана, угарного газа, углекислого газа, органических тканей на основе холестерических жидких кристаллов, допированных наночастицами неорганических материалов.

Теоретически обоснованы и реализованы методы построения и схемотехнические решения помехоустойчивого сигнального преобразователя импеданса для оптических сенсоров неинвазивной медицины, позволяющих проводить исследования биомедицинских параметров путем комплексного анализа импеданса на частотах 0.1-12 Гц при активации оптическим излучением инфракрасного диапазона в пределах 950- 1500 нм.

Разработаны новые сенсорные устройства для исследования проводимости органических полупроводниковых материалов с использованием специализированных моделей типа элемента Варбурга для частотного диапазона 0,01Гц-100 кГц и реализованы структуры сигнальных преобразователей импедансного типа и информационно-измерительных систем на основе современных микропроцессорных систем ADuC 834 и PSoC, с интегрированными каналами передачи данных для компьютерного анализа. Полученные результаты измерений подтверждают высокую эффективность использования помехоустойчивых сигнальных преобразователей и соответствие параметров этих преобразователей результатам модельных исследований.

Ключевые слова: импеданс, импедансная спектроскопия, сигнальный преобразователь, диаграмма Найквиста, конвертор импеданса, SPICE модель.

ABSTRACT

Barylo G.I. Structure and parameteric modification of microelectronic impedance signal converters for sensor technology. - Manuscript.

Dissertation for the Doctor of Technical Sciences degree in specialty 05.27.01 "Solid State Electronics". – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The dissertation is devoted to the problem of microelectronic signal impedance converters modification and the creation of a new subclass of multi-bit high-sensitive converters for physical quantities sensors. Galvanostatic and potentiostatic methods of impedance measuring with periodic and nonperiodic activating signals were theoretically substantiated and implemented. The methods of impedance signal converters mathematical analysis and their functional units were improved for increasing the accuracy of the transformation, taking into account phase-frequency parameters of activating signal sources, temperature, modulation of parameters of elements, temporal instability of amplitude, phase as well as the influence of external sources of signals and noise. The basic regularities of impedance characteristics with impulse and periodic activation signals are established. Methods of impedance calculating on the basis of mathematical modeling with the account of revealed regularities are developed.

The mathematical modeling of microelectronic impedance signal converters was carried out and transformation function dependence on the parameters of the activating signal (periodic, nonperiodic, pulse) and deviations of the parameters of their components caused by internal and external factors, which was the basis of their structural and parametric modification was investigated. A number of new structural elements of the impedance converters on the basis of solid state electronics elements - the sources of signals, amplifiers, filters, detectors, integrators was investigated. They take into account the influence of temperature, modulation of element parameters, time, amplitude and phase instability of the information signal, as well as third-party sources of signals and electromagnetic interference that provide formation of an informative signal in the range of measurement $-2 \dots 2$ V, with an 0.1% error of signal conversion and effective reduction of noise level by 10 dB with the possibility of using a 24-bit digital converter for sensor technology.

Four-bit integration of the information signal was used. This allows to expand the functionality of the measurement transformation of the impedance and increase the accuracy of the measurement which allows to realize the principle of redundancy of signals and to carry out verification of calibration of signal paths and compensation of their zero drift and to directly integrate the informative current through the investigated two-terminal in potentiostatic type converters.

The methods of signal converters construction and signal converters mathematical models for optical sensors based on photoelectronic transducers with periodic rectangular activating signals are substantiated and implemented. The use of pulse activating signals in the range 100 Hz – 100 kHz provides measurement of the

concentration of gases and gas mixtures based on the basis to the accuracy of 0.1%. Schematic design solutions for construction and practical implementation of signal transducers for optical methane, carbon monoxide, carbon dioxide, organic fabrics sensors based on cholesteric liquid crystals of inorganic materials supplemented with nanoparticles was developed.

Methods of a noise-immune signal impedance converter structure for optical non-invasive medical sensors that allow to carry out research on biomedical parameters by complex analysis of the impedance at frequencies of 0.1-12 Hz activated by optical radiation of the infrared range 950 - 3000 nm are developed and implemented.

New sensor devices for the investigation of the conductivity of organic semiconductor materials, using specialized models of the Warburg-type element for the frequency range 0.01 Hz-100 kHz were developed. Structures of impedance type signal converters and information-measuring systems based on modern productive microprocessor systems ADuC 834 and PSoC with integrated data channels for computer analysis were implemented. The obtained results of measurements confirm the high efficiency of the use of noise-proof signal converters and the correspondence of parameters of these converters to the results of model research.

Key words: electrical impedance, impedance spectroscopy, impedance measurement, signal converter, Nyquist diagram, SPICE model.