

БАРИЛО ГРИГОРІЙ

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0001-5749-9242>e-mail: hryhorii.i.barylo@lpnu.ua**ПАВЛЕНКО МИХАЙЛО**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0002-8697-7236>e-mail: mykhailo.v.pavlenko@lpnu.ua**АДАМ'ЯК ОЛЕГ**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-6290-6516>e-mail: oleh.a.adamiak@lpnu.ua**НИКОН ОЛЕГ**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0001-6514-1141>e-mail: oleh.a.nykon@lpnu.ua**СОРОКА ВЛАДИСЛАВ**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0009-6539-8148>e-mail: vladyslav.i.soroka@lpnu.ua

АЛГОРИТМ МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІМПЕДАНСУ ДЛЯ СЕНСОРНИХ ПРИСТРОЇВ

В роботі розглянуто алгоритм SPICE моделювання сигнальних кіл імпедансної спектроскопії. Запропонований підхід забезпечує високу інформативність та універсальність моделювання, зокрема можливість параметричного аналізу масиву сигналів активної та реактивної складових імпедансу. Алгоритм застосовано до аналізу функціонування квадратурного детектора, що дозволило оцінити точність сигнального перетворення та вплив частотних характеристик компонентів на результат.

Ключові слова: імпедансна спектроскопія, SPICE модель, сигнальний перетворювач, параметричний аналіз.

BARYLO HRYHORII, PAVLENKO MYKHAILO, ADAMIAK OLEH, NYKON OLEH, SOROKA VLADYSLAV
Lviv Polytechnic National University

ALGORITHM FOR MODELING IMPEDANCE SIGNAL CONVERTERS FOR SENSOR DEVICES

This study focuses on the development and application of a SPICE modeling algorithm designed for impedance spectroscopy circuits. Impedance spectroscopy is a method widely utilized in sensor technologies and data fusion systems to measure and analyze complex electrical properties. The paper emphasizes the need for advanced modeling techniques that improve the accuracy and reliability of signal conversion in sensor networks and mixed-signal electronics. The developed algorithm leverages modern SPICE macromodels, such as the Differentiator Macro, Multiplier Macro, and Integrator Macro, to simulate active (ZRE) and reactive (ZIM) components of impedance with high precision. These components are crucial for analyzing Nyquist diagrams, which graphically represent impedance in the complex plane.

The proposed modeling approach addresses key challenges in impedance measurement, including frequency modulation and the influence of circuit component parameters on signal characteristics. By employing parametric analysis, the algorithm enables researchers to investigate the impact of operational amplifier Gain Bandwidth (GBW) and other critical parameters on the accuracy of impedance measurement. The study presents practical examples demonstrating the algorithm's application to a quadrature detector—a key element in impedance conversion circuits. Results indicate that signal conversion accuracy significantly improves with GBW values of operational amplifiers exceeding 1E7 Hz, underscoring the importance of selecting high-quality components for circuit design.

The versatility of the algorithm lies in its ability to simulate a broad range of operational conditions and to optimize circuit performance by adjusting component specifications. This capability is particularly relevant in the context of modern sensor systems, where reliability and precision are paramount. The findings contribute to the field of mixed-signal electronics, providing a robust framework for analyzing and designing advanced impedance spectroscopy circuits. This research paves the way for further innovations in sensor technology and data fusion systems, where accurate impedance measurement is essential for achieving high-performance functionality.

Keywords: impedance spectroscopy, SPICE model, signal converter, parametric analysis.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У цій статті ми досліджуємо проблему обмеженої функціональності сигнальних перетворювачів ємнісних сенсорів. Ця проблема є важливою, тому що вона призводить до зниження точності та надійності вимірювань. Дане дослідження спрямоване на вирішення цієї проблеми шляхом розробки нового мультифункціонального режиму роботи сигнальних перетворювачів. Цей режим передбачає формування додаткових сімейств сигналів, які дозволяють не лише проводити вимірювання, але й здійснювати самодіагностику та виявляти паразитні взаємозв'язки, завдяки чому підвищується достовірність результатів вимірювання.

У цій статті розглядається проблема підвищення точності та ефективності моделювання сигнальних каналів, що застосовуються в імпедансній спектроскопії. Ця проблема є важливою через зростаючі вимоги до функціональності сенсорних систем у сучасних технологіях, зокрема в контексті злиття даних та аналізу

сигналів. Традиційні підходи до моделювання часто обмежені у врахуванні складних залежностей між параметрами компонентів та сигналами. Це може призводити до значних похибок у вимірюваннях і знижувати надійність роботи сенсорних систем.

Дане дослідження спрямоване на розробку універсального алгоритму SPICE моделювання, який дозволяє проводити параметричний аналіз та оптимізацію сигнальних трактів. Основна увага приділяється моделюванню активних і реактивних складових імпедансу та дослідженню залежностей точності перетворення від частотних характеристик компонентів. Запропонований підхід сприяє створенню більш надійних і точних сенсорних систем, що є ключовим для широкого спектра наукових і практичних завдань.

Аналіз досліджень та публікацій

Розвиток інформаційних технологій в значній мірі базується на технологіях злиття даних (Data Fusion) [1], і зокрема використання цих технологій в системах керування [2], сенсорній техніці [3], сенсорних мережах [4] тощо. Сформувалось поняття злиття сенсорів (Sensor Fusion) [5].

В сенсорній тематиці технології злиття даних обумовили підвищення зацікавленості в подальшому удосконаленню та розширенню функціональності мікросхемотехніки змішаного сигнального перетворення [6], в якій поєднуються новітні рішення аналогового перетворення сигналу з вже традиційною мікропроцесорною технікою. Відтак сформувалось поняття аналогового фронт-енду (Analog Front-End), розвиток якого представлено, зокрема, роботами з розробки спеціалізованих CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor) інтегральних схем вимірювання електричної ємності [7, 8], вимірювальних перетворювачів резистивно-ємнісних структур [9], трансімпедансних підсилювачів [10] тощо. В цих роботах акцентується увага на мікросхемотехніці, що реалізує мультипараметричність сигнальних кіл, а відтак, розширення бази інформативних сигналів. Це, в свою чергу, забезпечує можливість реалізації вищезгаданих технологій злиття даних.

Один з перспективних напрямків мікросхемотехніки аналогового фронт-енду базується на вимірювальних перетворювачах імпедансної спектроскопії [11]. Розрахунок імпедансних діаграм (діаграмам Найквіста) передбачає перехід від амплітудно-частотних (АЧХ) та фазо-частотних характеристик (ФЧХ) діаграм Боде до зображення імпедансу на комплексній площині. На відміну від діаграм Боде діаграми Найквіста не містять безпосередніх значень частоти. При цьому імпеданс Z для заданої частоти \square представляється точкою на комплексній площині, яка описує годограф імпедансу. Імпедансний метод аналізу полягає в якісній та кількісній оцінці форми такого годографа, що дає можливість використання технологій злиття даних для інтерпретації структури досліджуваного об'єкту [12].

Для встановлення закономірностей формування масиву сигналів імпедансної спектроскопії використовують методи математичного моделювання. В мікросхемотехніці здебільшого використовують методи SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) моделювання [13].

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: побудова алгоритму SPICE моделювання сигнальних кіл імпедансної спектроскопії, новизною якого є висока інформативність та універсальність модельного дослідження, зокрема, можливість параметричного аналізу масиву інформативних сигналів активної та реактивної складових імпедансу при модуляції частоти активації досліджуваного двополюсника з врахуванням параметрів компонентів сигнальних кіл.

Виклад основного матеріалу

Синтез імпедансних діаграм Найквіста (AC Analysis)

При побудові сигнальної SPICE моделі сигнальних кіл імпедансної спектроскопії на першому етапі необхідно провести вибір та специфікацію задаючих джерел вхідних сигналів. Імпедансна спектроскопія базується на двох основних методах дослідження – потенціостатичному та гальваностатичному. В першому з них імпеданс вимірюється шляхом активації (частотної модуляції) прикладеної до досліджуваного двополюсника напруги $V(t)$, а в другому – модуляції струму через двополюсник. Елементарний підхід синтезу імпедансних діаграм Найквіста передбачає використання малосигнального аналізу сигналів, що реалізується методом AC Analysis. На рис. 1 представлено специфікація задаючого джерела типу Independent Voltage Source AC SIN та приклад форми сигналу для декількох значеннях $VINP.sin.freq=1E2...1E3$. Таке джерело використовують в потенціостатичному методі аналізу.

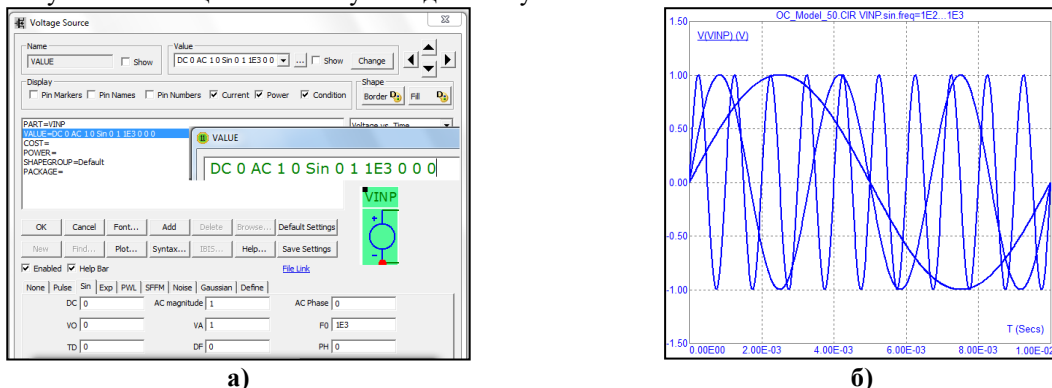


Рис. 1. Універсальне джерело Voltage Source: а) - вікно специфікації ; б) - форма сигналу при $VINP.sin.freq=1E2...1E3$

Натомість в гальваностатичному методі, схема доповнюється керованим джерелом струму NFI (Function Source – Formula type current - Analog behavioral current source), специфікація миттєвих значень струму якого визначається вищевказаним джерелом напруги Independent Voltage Source. Елементарна схеми заміщення двополюсника, що активується керованим джерелом струму GI в гальваностатичному методі, та приклад діаграм АЧХ та ФЧХ падіння напруги на двополюснику (у вузлі V(2)) представлено на рис. 2, а.

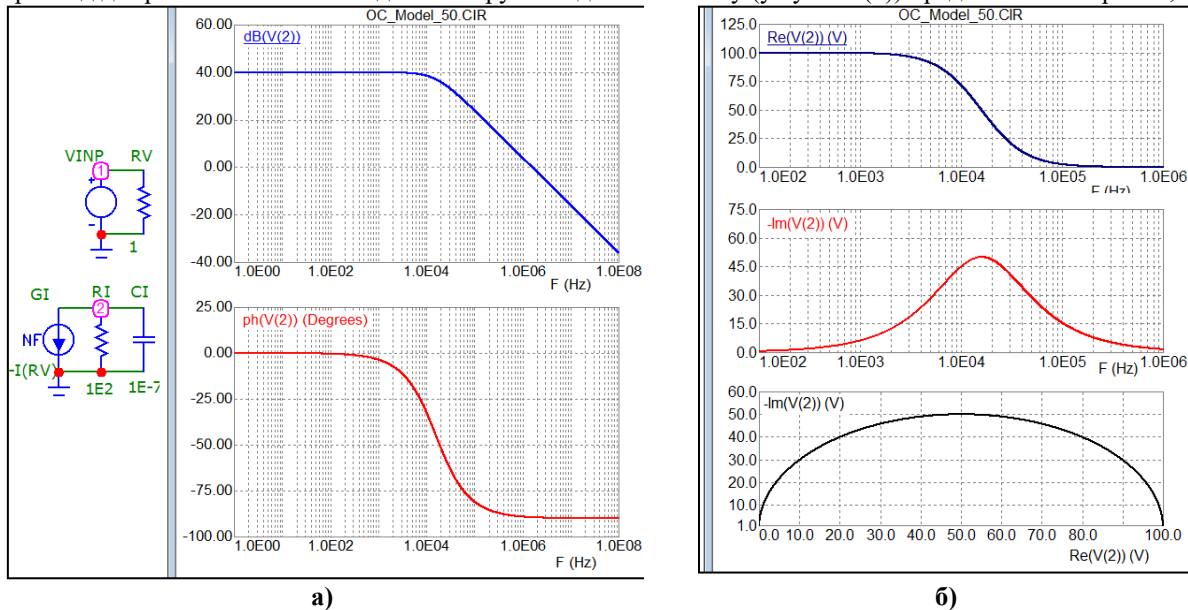


Рис. 2. Схема заміщення двополюсника: а) - АЧХ dB(V(2)), ФЧХ ph(V(2)); б) - залежності Re(V(2)), Im (V(2))

Для розрахунку активної Z_{RE} та реактивної Z_{IM} складових імпедансу у відповідності до набору вбудованих функцій АС аналізу використовують розширені опції - X or Y Expression -> Functions -> Complex -> Re, Im. Результат такого розрахунку а також приклад побудови діаграми Найквіста $Im(V(2)) = f(Re(V(2)))$ представлено на рис. 2, б.

Синтез інформативних сигналів (Transient Analysis)

Наступний етап модельного дослідження передбачає синтез інформативних сигналів з використанням методу Transient Analysis. Для формування сигналів дійсної Z_{RE} та уявної Z_{IM} складових імпедансу використовують відповідні складові напруги - дійсної V_{RE} та уявної V_{IM} , що формується фазочутливими квадратурними детекторами у відповідності до виразів нормалізованого перемноження та інтегрування:

$$Z_{RE} = K_{RE} \cdot \int_{t_1}^{t_2} (V(t) \cdot S_{RE}(t)) dt \quad Z_{IM} = K_{IM} \cdot \int_{t_1}^{t_2} (V(t) \cdot S_{IM}(t)) dt$$

де $V(t)$ – миттєві значення напруги на досліджуваному двополюснику; K_{RE} та K_{IM} – нормалізуючі коефіцієнти пропорційності функції перетворення; t_1, t_2 – часові інтервали інтегрування; $S_{RE}(t), S_{IM}(t)$ – знакові функції нормалізованого перемноження, які, в залежності від фази, приймають значення +1 чи -1 - $S_{RE}(t) = 1$ при $t = [0...π]$, $D_{RE}(t) = -1$ при $t = [π...2π]$; $S_{IM}(t) = 1$ при $t = [0...π/2]$ та $[3π/2...2π]$, $D_{IM}(t) = -1$ при $t = [π/2...3π/2]$.

На цьому етапі в схему сигнального перетворювача вводять компоненти імпульсів керування, зокрема, формувачі вищезгаданих знакових функцій $S_{RE}(t), S_{IM}(t)$, що, в залежності від фази, приймають значення +1 чи -1 - $S_{RE}(t) = 1$. Приклад такої реалізації для вхідного джерела VIN при трьох значеннях зсуву фази ($VIN.sin.ph = 10, 20, 30$) представлено на рис. 3. В даному прикладі використовується компонент Comparator (XComp). Діаграми демонструють вхідний сигнал V(1) та результат його компарування відносно нульового значення напруги V(2).

Для реалізації квадратурного детектування необхідно сформувати два зсунутих на фазу 90° сигнали керування $S_{RE}(t), S_{IM}(t)$. Зсув фази можна здійснити з використанням макромоделі компоненту часової затримки типу DELAY (Analog Delay Macro). Однак, і це принципово важливо з точки зору розробки методики модельних досліджень квадратурних детекторів, така реалізація не є оптимальною. Причина тут у тому, що в ході модельних досліджень передбачається встановлення закономірностей формування дійсної Z_{RE} та уявної Z_{IM} складових імпедансу від частоти вхідного сигналу (частоти активації вимірюваного двополюсника). При цьому девіація частоти задаючого сигналу $VIN.sin.f$ потребує відповідну зміну параметрів макромоделі компоненту DELAY (Analog Delay Macro). Така одночасна девіація по двох параметрах є неможливою, принаймні, дуже неефективною, в процесі модельних досліджень.

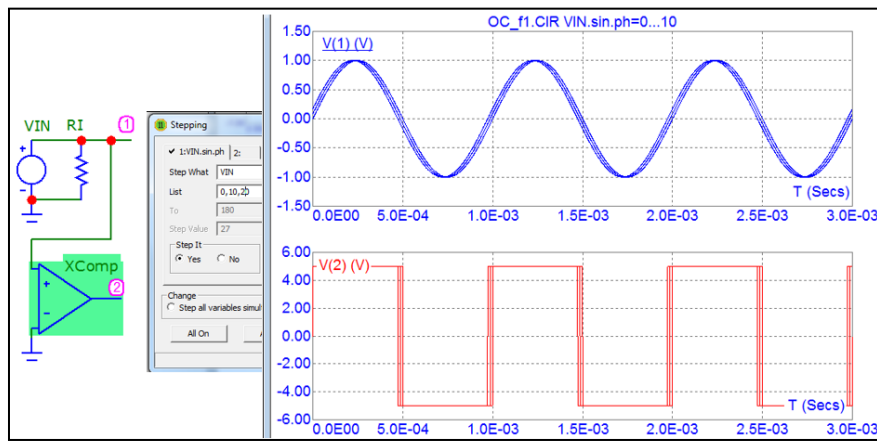


Рис. 3. Схема формування імпульсів керування на основі компаратора XComp

У відповідності до представленого в даній роботі алгоритму використано підхід, що дозволяє позбутися вказаного недоліку. Реалізується цей підхід на макромоделі диференціатора DIF (Differentiator Macro). Результат формування зсунутого на 90° гармонічного коливання без паразитних перехідних процесів представлено на рис. 4.

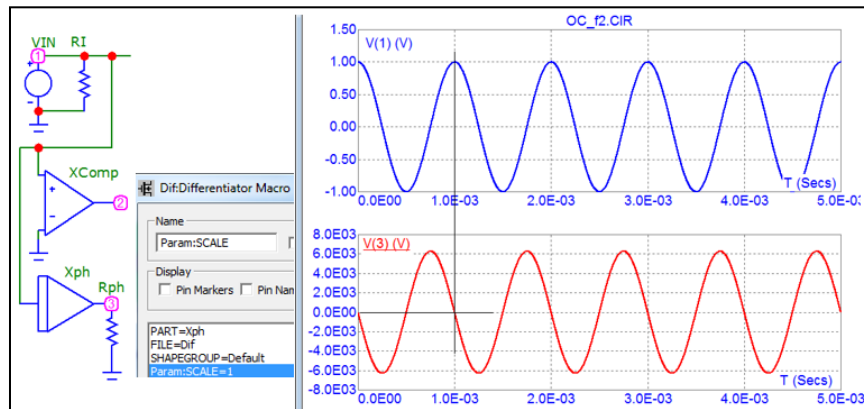


Рис. 4. Формування фазового зсуву на компоненті DIF (Differentiator Macro)

З врахуванням цього рішення, на рис. 5 представлено оптимальний варіант схеми модельних досліджень квадратурного детектування сигналів та результат формування, прив'язаних за частотою до задаючого сигналу $V(1)$, імпульсів керування дійсної $S_{RE}(t)$ та уявної $S_{IM}(t)$ складових імпедансу. Можна бачити повну відповідність цих імпульсів керування до специфіки кдватратурних детекторів дійсної Z_{RE} та уявної Z_{IM} складових імпедансу.

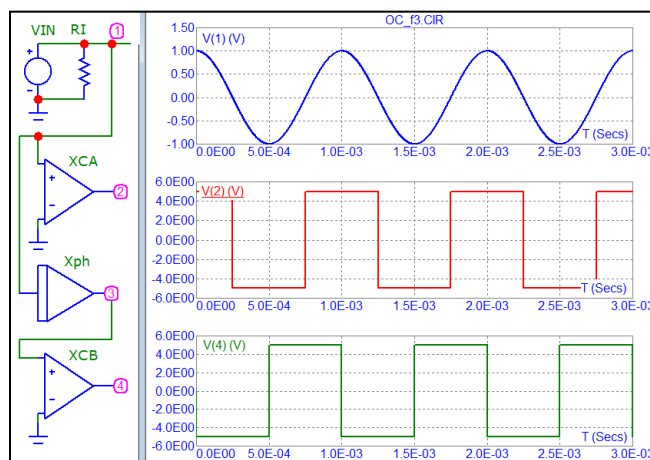


Рис. 5. Формування імпульсів керування $S_{RE}(t)$, $S_{IM}(t)$

Для реалізації функції нормалізованого перемноження та інтегрування використано макромоделі MUL (Multiplier Macro) та INT (Integrator Macro). В результаті отримуємо схему заміщення макромоделі сигнальних перетворювачів імпедансного типу, що містить задаюче джерело напруги V_{IN} , диференціатор формування зсунутого на 90° гармонічного коливання Xph , два компаратори XCA , XCB формування сигнали

керування $S_{RE}(t)$, $S_{IM}(t)$, два аналогових перемножувача XMA, XMB формування добутку функцій $V(t) \cdot S_{RE}(t)$, $V(t) \cdot S_{IM}(t)$ та два інтегратора формування вихідних інформаційних сигналів дійсної Z_{RE} та уявної Z_{IM} складових імпедансу (рис. 6).

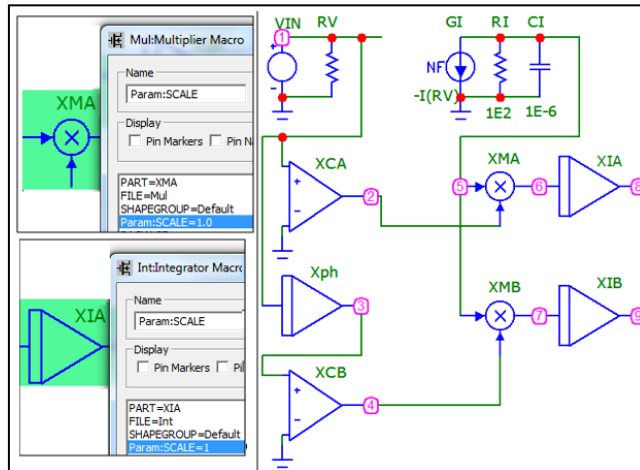


Рис. 6. Схема сигнальних перетворювачів з використанням макромоделей MUL (Multiplier Macro) та INT (Integrator Macro)

Параметричний аналіз сигнальних кіл квадратурного детектування

Базова схема вимірювального перетворювача імпедансу на основі квадратурного детектора наведена на рис. 7 а. Принцип функціонування схеми полягає в синхронному детектуванні входньої напруги V_Z , яка формується колами вимірювальних перетворювачів гальваностатичного чи потенціометричного типів. Для реалізації детектування формують інверсні (на операційному підсилювачі OA_1) та не інверсні (на OA_2) розв'язуючі повторювачі (з модулем коефіцієнту передачі $|K_V|=1$), вихідні напруги яких по чергово перемикаються комутаторами SW_1 , SW_2 та усереднюються вузлами Σ_1 , Σ_2 . В загальному, усереднення може здійснюватися цифровими методами, інтегруванням чи низькочастотним фільтруванням. В даній схемі усереднення здійснюють інтеграторами INT_1 , INT_2 . Їх вихідні напруги - V_{RE} та V_{IM} - служать, відповідно, активною та реактивною складовими інформаційного сигналу імпедансу. Знакові функції активної та реактивної складових формуються, відповідно, джерелами SQ_{RE} та SQ_{IM} . Фази вихідних імпульсів цих джерел зміщені на $\pi/2$.

Кількісними параметрами, що використовуються для аналізу точності функціонування квадратурного детектора, є відношення отриманих Transient аналізом значень вихідних напруг V_{RE} та V_{IM} до їх ідеалізованих значень, отриманих АС аналізом. Аналіз проводимо використовуючи RC двополосник з характерною частотою $f_0 = 0,1$ МГц ($R_X = 1E3$, $C_X = 1.591E-9$).

Для мінімізації впливу інших вузлів сигнального перетворювача на результати далі наведеного параметричного аналізу квадратурного детектора забезпечуємо дві умови: по-перше, використаємо ідеалізовану модель задаючого джерела струму, i , по-друге, вихідні інформативні сигнали формуємо виключно на математичному рівні (без використання вузлів на фізичному рівні). Схема модельного дослідження квадратурного детектора, в якій реалізовано ці умови наведена на рис. 7 б. Для формування вихідних сигналів використовуємо вищезгадані макромоделі інтеграторів INT (Integrator Macro) чи відповідну функцію бібліотеки MicroCAP - SD(V(X)), де X – номер вузла, напруга V(X) на якому інтегрується за часом (Running integral with respect to time).

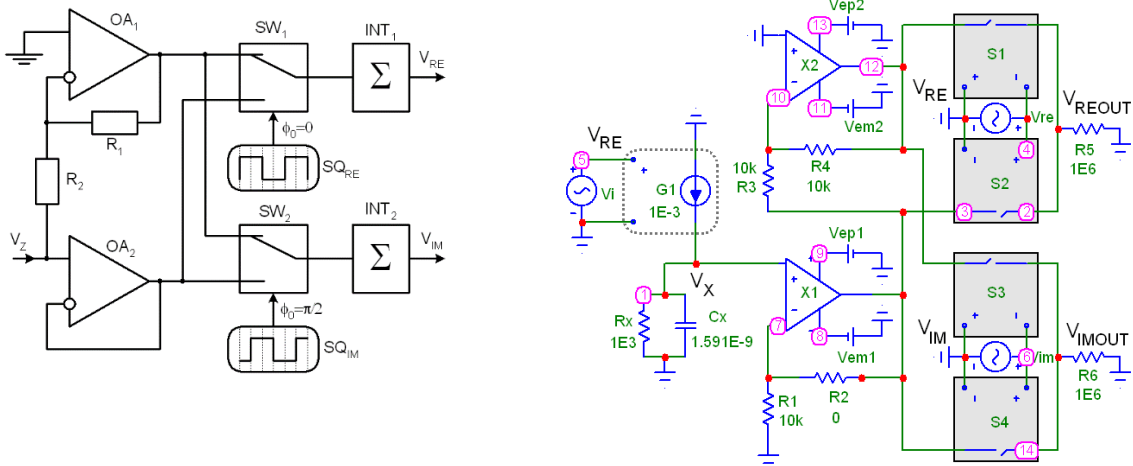


Рис. 7. Квадратурний детектор: а) – базова схема; б) - SPICE модель

Джерело струму G1 з коефіцієнтом перетворення $K_1 = 1E-3$ керується задаючою напругою V_{RE} (джерело V_i). Вихідна напруга на двополоснику R_X, C_X повторюється на операційному підсилювачі X1 (з нульовим опором резистора зворотного зв'язку $R_2 = 0$) та інвертується на операційному підсилювачі X2. У фазі з цією задаючою напругою V_{RE} джерелом V_{re} формуються сигнали керування ключів S1 та S2.

Перший з них комутує напругу інвертуючого, а другий неінвертуючого повторювачів. В результаті такого комутування на резисторі R5 (вузол 2) формується вихідна напруга V_{REOUT} , подальше числове інтегрування якої $SD(V(2))$ забезпечує формування інформативного сигналу активної складової імпедансу SD_{RE} . Аналогічно зі схемотехнічної точки зору формується інформативний сигнал реактивної складової імпедансу SD_{IM} . Відмінністю тут є лише фаза напруги джерела V_{im} , яке формує сигнали керування ключів S3 та S4. Як це вже відзначалося, фаза напруги V_{im} цього джерела є зміщеною на чверть періоду відносно опорної напруги V_{RE} джерела V_i .

Специфікація SPICE моделей вказаних ключів та джерел є наступною: MODEL SW1 VSWITCH (ROFF=1000MEG, VON=0.001, VOFF=-0.001); MODEL VRE SIN (F=100K, PH=0); MODEL VIM SIN (F=100K, PH=pi/2).

З врахування вищенаведених початкових умов були проведені численні дослідження точності сигнального перетворення квадратурного детектора при різних значеннях параметрів моделей операційних підсилювачів. При цьому, з метою виявлення характерних закономірностей проводилася покрокова зміна частотних параметрів підсилювачів при фіксації інших, менш значущих параметрів.

Отримані в ході таких досліджень результати кількісного порівняння точності сигнального перетворення наведені на: рис. 8, а (номінальні умови), де $ReZ \equiv SD_{RE}$, $-ImZ \equiv SD_{IM}$ при $R_X = 1E3$, $C_X = 1.591E-9$; та рис. 8, б (граничні умови), де $ReZR \equiv SD_{RE}$, $-ImZR \equiv SD_{IM}$ при $R_X = 1E3$, $C_X = 0$ (для двополосника без реактивної складової), $ReZC \equiv SD_{RE}$, $-ImZC \equiv SD_{IM}$ при $R = \infty$, $C_X = 1.591E-9$, (для двополосника без активної складової імпедансу).

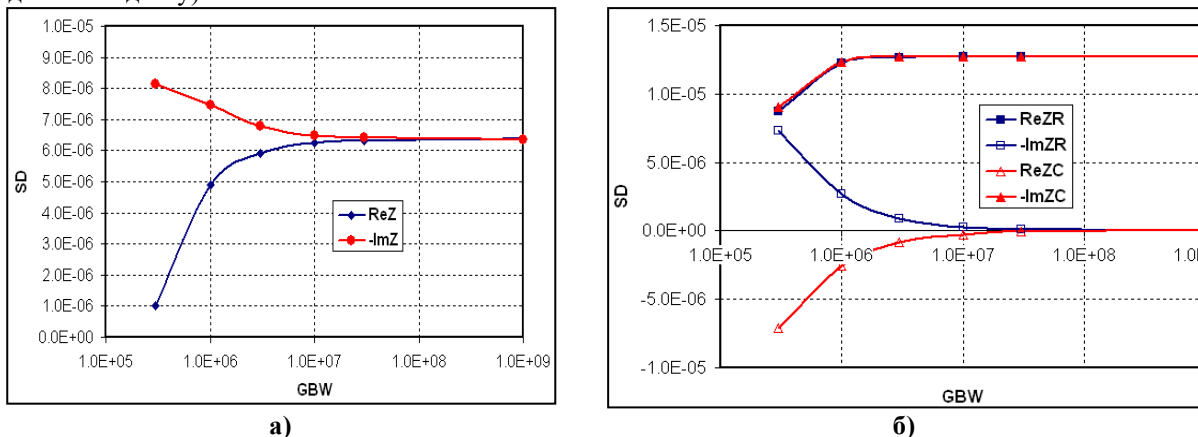


Рис. 8. Залежності ReZ та $-ImZ$ від GBW : а) - при $R_X = 1E3$, $C_X = 1.591E-9$; б) - при граничних умовах

Наведені результати дають змогу провести кількісний аналіз похибки сигнального перетворення, зокрема вплив на похибку частотних характеристик компонентної бази. Здебільшого, використовують характеристику GBW (Gain Band Width). Критерієм високої точності детектування сигналів, як це вже відзначалося, є рівність значень $ReZ = -ImZ$ при номінальних умовах та $ReZR = -ImZC = Max$, $ReZC = -ImZR = 0$ при граничних умовах. Для прикладу можна відзначити той факт, що при $GBW = 1E6$ (зокрема, для операційного підсилювача AD8541/2/4) розходження значень $ReZ \equiv SD_{RE}$, $-ImZ \equiv SD_{IM}$ є дуже значне: $\approx 5E-6$ та $\approx 7,5E-6$, відповідно. Значними є також відхилення від нульових значень величин $ReZC$ та $-ImZR$: $\approx -0,25E-6$ та $\approx 0,25E-6$, відповідно. Таким чином показано, що для вимірювання імпедансу двополосника з характерною частотою $f_0 = 0,1$ МГц ($R_X = 1E3$, $C_X = 1.591E-9$) операційні підсилювачі квадратурного детектора повинні характеризуватися смугою частот $GBW = 1E7$ і вище.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В роботі запропоновано алгоритм SPICE моделювання сигнальних перетворювачів імпедансної спектроскопії, новизною якого є висока інформативність та універсальність модельного дослідження, зокрема, можливість параметричного аналізу масиву інформативних сигналів активної ZRE та реактивної ZIM складових імпедансу. Такий масив сигналів формують модуляцією частоти активації досліджуваного двополосника з врахуванням параметрів компонентів. Для підвищення ефективності дослідження в запропонованому алгоритмі використовуються розширені функціональні можливості та відповідні SPICE макромоделі, зокрема, DIF (Differentiator Macro), MUL (Multiplier Macro) та INT(Integrator Macro).

Алгоритм SPICE моделювання сигнальних кіл імпедансної спектроскопії використано на прикладі параметричного аналізу основного вузла сигнального перетворювача - квадратурного детектора. Отримані результати дають змогу провести кількісний аналіз похибки сигнального перетворення, зокрема вплив на похибку частотних характеристик компонентної бази, зокрема параметру операційних підсилювачів GBW

(Gain Band Width).

Автори висловлюють щирю вдячність Міністерству освіти і науки України за фінансову підтримку цього дослідження (грант «Органічний пристрій із внутрішнім підсиленням фотоструму для реєстрації слабких сигналів у близькій інфрачервоній області спектра», № 0123U101690).

Література

1. M. S. Ram, A. Sreeram, M. Poongundran, P. Singh, Y. N. Prajapati and S. Myrzahmetova, "Data Fusion Opportunities in IoT and its Impact on Decision- Making Process of Organisations," 2022 6th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), Madurai, India, 2022, pp. 459-464, doi: 10.1109/ICICCS53718.2022.9788232.
2. R. Fan, L. Li and X. Hong, "Research On Application of Data Fusion In Streetlights Control System," 2020 Chinese Automation Congress (CAC), Shanghai, China, 2020, pp. 739-742, doi: 10.1109/CAC51589.2020.9327316.
3. A. Urru, D. Piras and A. Palmas, "Data Fusion algorithms to improve test range sensors accuracy and precision," 2019 International Conference on Range Technology (ICORT), Balasore, India, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICORT46471.2019.9069667.
4. J. K. Wu and Y. F. Wong, "Bayesian Approach for Data Fusion in Sensor Networks," 2006 9th International Conference on Information Fusion, Florence, Italy, 2006, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIF.2006.301810.
5. I. Khokhlov, S. Chuprov and L. Reznik, "Integrating Security with Accuracy Evaluation in Sensors Fusion," 2022 IEEE Sensors, Dallas, TX, USA, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/SENSORS52175.2022.9967235.
6. S. Sadjina, R. S. Kanumalli, K. Dufrière, M. Huemer and H. Pretl, "A Mixed-Signal Circuit Technique for Cancellation of Multiple Modulated Spurs in 4G/5G Carrier Aggregation Transceivers," in IEEE Solid-State Circuits Letters, vol. 2, no. 11, pp. 260-263, Nov. 2019, doi: 10.1109/LSSC.2019.2929025.
7. Барило Г.І. Мультифункціональний перетворювач сигналів ємнісних сенсорів / Барило Г.І., Голяка Р.Л., Адам'як О.А., Савицький А.В., Шкрибінець В.В.// Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. –№5, 2024 (341). –С. 182–188.
8. G. Ferri, F. R. Parente, V. Stornelli, A. D'Amico, G. Pennazza and M. Santonico, "A standard CMOS technology fully-analog differential capacitance sensor front-end," 2015 6th International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI), Gallipoli, Italy, 2015, pp. 152-157, doi: 10.1109/IWASI.2015.7184939.
9. Y. Kwon et al., "Low Noise Dual-Mode Sensor Analog Front-End for Capacitive and Resistive Microsensors," 2020 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC), Barcelona, Spain, 2020, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICEIC49074.2020.9051379.
10. J. Seo et al., "An analog front-end IC with regulated R-I amplifier and CDS CTIA for microbolometer," 2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2013), Gwangju, Korea (South), 2013, pp. 1312-1315, doi: 10.1109/ICCAS.2013.6704156.
11. Maria L. Lopez Rodriguez, Rossana Madrid, Carla Giacomelli. Evaluation of Impedance Spectroscopy as a Transduction Method for Bacterial Biosensors // IEEE Latin America Transactions. –2013. – Vol. 11, Issue 1. – PP. 196 – 200.
12. Kiseok Song, Unsoo Ha, Seongwook Park. An Impedance and Multi-Wavelength Near-Infrared Spectroscopy IC for Non-Invasive Blood Glucose Estimation // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2015. – Vol. 50. – Issue 4. – PP. 1025 – 1037.
13. A. Pak, S. M. Mousavi, D. Pommerenke, G. Maghlaelidze and Y. Xu, "Improvement of SPICE based ESD Protection Models for I/O Protection Modeling," 2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium, Raleigh, NC, USA, 2021, pp. 1006-1011, doi: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559224.

References

1. M. S. Ram, A. Sreeram, M. Poongundran, P. Singh, Y. N. Prajapati and S. Myrzahmetova, "Data Fusion Opportunities in IoT and its Impact on Decision- Making Process of Organisations," 2022 6th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), Madurai, India, 2022, pp. 459-464, doi: 10.1109/ICICCS53718.2022.9788232.
2. R. Fan, L. Li and X. Hong, "Research On Application of Data Fusion In Streetlights Control System," 2020 Chinese Automation Congress (CAC), Shanghai, China, 2020, pp. 739-742, doi: 10.1109/CAC51589.2020.9327316.
3. A. Urru, D. Piras and A. Palmas, "Data Fusion algorithms to improve test range sensors accuracy and precision," 2019 International Conference on Range Technology (ICORT), Balasore, India, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICORT46471.2019.9069667.
4. J. K. Wu and Y. F. Wong, "Bayesian Approach for Data Fusion in Sensor Networks," 2006 9th International Conference on Information Fusion, Florence, Italy, 2006, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIF.2006.301810.
5. I. Khokhlov, S. Chuprov and L. Reznik, "Integrating Security with Accuracy Evaluation in Sensors Fusion," 2022 IEEE Sensors, Dallas, TX, USA, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/SENSORS52175.2022.9967235.
6. S. Sadjina, R. S. Kanumalli, K. Dufrière, M. Huemer and H. Pretl, "A Mixed-Signal Circuit Technique for Cancellation of Multiple Modulated Spurs in 4G/5G Carrier Aggregation Transceivers," in IEEE Solid-State Circuits Letters, vol. 2, no. 11, pp. 260-263, Nov. 2019, doi: 10.1109/LSSC.2019.2929025.
7. Baryilo, H. I., Holiaka, R. L., Adamiak, O. A., Savytskyi, A. V., & Shkribynets, V. V. (2024). Multifunctional signal converter for capacitive sensors. *Visnyk of Khmelnytskyi National University. Series: Technical Sciences*, (5), 182–188.
8. G. Ferri, F. R. Parente, V. Stornelli, A. D'Amico, G. Pennazza and M. Santonico, "A standard CMOS technology fully-analog differential capacitance sensor front-end," 2015 6th International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI), Gallipoli, Italy, 2015, pp. 152-157, doi: 10.1109/IWASI.2015.7184939.

-
9. Y. Kwon et al., "Low Noise Dual-Mode Sensor Analog Front-End for Capacitive and Resistive Microsensors," 2020 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC), Barcelona, Spain, 2020, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICEIC49074.2020.9051379.
 10. J. Seo et al., "An analog front-end IC with regulated R-I amplifier and CDS CTIA for microbolometer," 2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2013), Gwangju, Korea (South), 2013, pp. 1312-1315, doi: 10.1109/ICCAS.2013.6704156.
 11. Maria L. Lopez Rodriguez, Rossana Madrid, Carla Giacomelli. Evaluation of Impedance Spectroscopy as a Transduction Method for Bacterial Biosensors // IEEE Latin America Transactions. –2013. – Vol. 11, Issue 1. – PP. 196 – 200.
 12. Kiseok Song, Unsoo Ha, Seongwook Park. An Impedance and Multi-Wavelength Near-Infrared Spectroscopy IC for Non-Invasive Blood Glucose Estimation // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2015. – Vol. 50. – Issue 4. – PP. 1025 – 1037.
 13. A. Pak, S. M. Mousavi, D. Pommerenke, G. Maghlakelidze and Y. Xu, "Improvement of SPICE based ESD Protection Models for I/O Protection Modeling," 2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium, Raleigh, NC, USA, 2021, pp. 1006-1011, doi: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559224.