

ЛОГАРИФМУЮЧІ ПІДСИЛЮВАЧІ СИГНАЛУ ДЛЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ СИСТЕМ МАГНІТНОГО ТРЕКІНГУ

Р. Л. Голяка, Т. А. Марусенкова, Д. В. Федасюк
Національний університет «Львівська політехніка»

Анотація. Робота присвячена проблематиці сигнального перетворення у пристроях магнітного трекінгу. Вирішується задача розроблення та дослідження сигнального перетворювача програмно-апаратних систем магнітного трекінгу на основі логарифмуючого підсилювача. Розглядаються модифіковані схеми логарифмуючого підсилення з допоміжними резистивними подільниками, перевагою яких є можливість розширення діапазону вихідної напруги логарифмуючих підсилювачів та оптимізація переходу між лінійною та логарифмічною ділянками підсилення. Представлені результати модельних та експериментальних досліджень логарифмуючого підсилювача системи магнітного трекінгу.

Ключові слова: магнітний трекінг, актюатор-сенсор, діапазон вимірювання, логарифмічний перетворювач, логарифмічна компресія, SPICE модель.

Вступ

Базовими апаратно-програмними компонентами віртуальної (VR – Virtual Reality) та доповненої (AR – Augmented Reality) реальності [1] є сенсори просторової навігації, з-поміж яких найвищу точність вимірювання положення об'єктів забезпечують пристрої магнітного трекінгу (MT – Magnetic Tracking). Метод магнітного трекінгу базується на визначенні просторового положення об'єктів за результатами вимірювання вектора індукції опорних магнітних полів у низькочастотному спектрі електромагнітного випромінювання. Відтак, іншою назвою цього методу є електромагнітний трекінг (EMT – Electromagnetic Tracking) [2]. У сенсорних пристроях магнітного трекінгу вимірювання просторового положення проводять з допомогою індуктивних котушок, які формують систему взаємопов'язаних пар – актюаторів та сенсорів. Актюаторні котушки формують магнітні поля, а сенсорні – вимірюють обумовлену цими полями напругу інформативного сигналу. Сигнали взаємного положення в парах «актюатор-сенсор» описуються функціональними залежностями, основними аргументами яких є коефіцієнт індуктивного взаємозв'язку в парі та, власне, вимірювальні величини трекінгу – відстань між котушками та їхній нахил одна відносно іншої. Суттєвими перевагами сенсорних пристроїв магнітного трекінгу відносно систем оптичного трекінгу є можливість функціонування поза зоною прямого бачення. Відносно систем інерційного трекінгу на основі інерційних вимірювальних модулів перевагами пристроїв магнітного трекінгу є можливість високоточного

вимірювання координат сенсорів відносно сформованої матрицею актюаторів системи координат та відсутність похибок, обумовлених часовим дрейфом сигналів акселерометрів [3] і гіроскопів [4]. Основною проблемою реалізації сенсорних пристроїв магнітного трекінгу є необхідність вимірювання сигналів (напруг) сенсорних котушок у широкому динамічному діапазоні – від одиниць мікрівольта при відстанях порядку декілька метрів в парах «актюатор – сенсор» і до сотень мілівольт при зменшенні такої відстані до одиниць сантиметрів.

У даній роботі представлено результати модельних та експериментальних досліджень спеціалізованих підсилювачів сигналу, в яких з метою вирішення вищезгаданої проблеми проводиться компресія напруг на основі логарифмуючого перетворення. Наведені результати є частиною комплексної роботи створення інтегрованих апаратно-програмних засобів магнітного трекінгу – Magnetic Tracking System Integrated Development Environment (MTS IDE), що проводиться нашим колективом в рамках ряду наукових і прикладних проектів. Це, зокрема, розроблення костюмів трекінгу рухів людини та інструментальних трекерів мікрохірургії у концепціях VR та AR. Запропоновані рішення дозволяють розширити просторову зону магнітного трекінгу при забезпеченні високої роздільної здатності вимірювання сигналу.

1. Огляд літератури

Кількість наукових публікацій за проблематикою магнітного трекінгу зростає з року в рік. У сучасній літературі ця проблематика представлена, зокрема, роботами, в яких проводиться: розрахунок просторового положення об'єктів в маг-

нітних системах трекінгу [5]; розроблення систем магнітного трекінгу для сканування ближніх полів (Near-Field Scanning) [6]; калібрування вимірювальних систем трекінгу з метою динамічної компенсації спотворень магнітного поля [7]; аналіз точності та моделювання похибок систем магнітного трекінгу [8]. Сучасними рішеннями інформаційно-вимірювальних систем магнітного трекінгу є: універсальний фреймворк (framework) ARIoT в концепціях доповненої реальності (AR – Augmented Reality) та Інтернету речей (IoT – Internet of Things) [9]; концепція синтезу даних (Data Fusion) у медичних пристроях візуалізації (Medical Imaging) [10], пристрої навігації хірургічних інструментів у медичній апаратурі [11]; технології біомедичної інженерії, зокрема, для моніторингу кінематики обличчя [12]; засоби мехатроніки гнучких роботів [13] тощо.

Для реалізації систем магнітного трекінгу використовують як спеціалізовані, так і уніфіковані котушки [14]. При цьому значну універсальність магнітного трекінгу забезпечують 3D (3-Dimension) малогабаритні котушки, зокрема [15]. Поєднання систем магнітного та інерційного трекінгу представлено в [16, 17].

2. Принцип функціонування та проблематика систем магнітного трекінгу

Принцип вимірювання в інформаційно-вимірювальних системах магнітного трекінгу полягає в розрахунку просторового положення об'єкта, зокрема, матриці координат на нахилів сенсора (Sensor) відносно заданої системи координат, в центрі якої з допомогою актюатора (Actuator) формується низькочастотне магнітне поле. Переважно сенсорами та актюаторами служать одно-, дво- чи тривимірні малогабаритні котушки (Рис. 1). Прикладами 3D котушок магнітного трекінгу, що випускаються серійно, є серія 3DV компанії Premo [18].

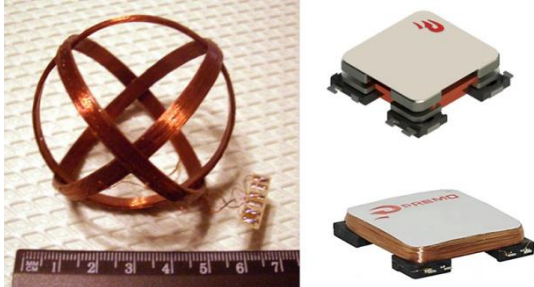


Рис. 1. Котушки сенсорних пристроїв магнітного трекінгу

У першому наближенні, вихідна напруга V_{OUT} сенсорної котушки пристроїв магнітного трекінгу визначається тригонометричними функціями, що описують кути розміщення сенсора відносно актюатора, та оберненою кубічною фу-

нкцією відстані L між сенсором та актюатором $V_{OUT} \propto L^{-3}$ [19]. При аналізі кутової роздільної здатності необхідно, щоб динамічний діапазон рівня сигналів забезпечував від двох до чотирьох порядків, в залежності від точності вимірювання. Суттєво ширший діапазон вимірювання обумовлює зміна відстані L . У пристроях магнітного трекінгу одними з найбільш важливих характеристик є мінімальна L_{MIN} та максимальна L_{MAX} відстані, в межах яких забезпечуються умови коректного вимірювання взаємного просторового положення в парах Actuator-Sensor (рис. 2).

Мінімальна L_{MIN} відстань визначається спотворенням форми та обмеженням (Cut-off) сигналу сенсора при його рівнях, що перевищують максимально допустимі значення напруг V_{MAX} в сигнальних колах (Voltage limitation level). Для сигнальних перетворювачів на Rail-to-Rail компонентах – операційних підсилювачах та аналого-цифрових перетворювачах – максимальні значення напруг V_{MAX} визначаються напругами живлення. Прикладом таких компонентів є серія операційних підсилювачів AD8601/AD8602/AD8604 [20].

Натомість, максимальна L_{MAX} відстань визначається співвідношенням сигнал-шум (Signal to noise level). При цьому динамічний діапазон сигнального перетворення визначається співвідношенням K_S інформативного сигналу $S(L_{MAX}) = S(L_{MIN} + L_D)$ на максимальній відстані $L_{MAX} = L_{MIN} + L_D$, де L_D – діапазон вимірювання, до інформативного сигналу $S(L_{MIN})$ на мінімальній відстані L_{MIN} . У першому наближенні це співвідношення можна описати кубічною функцією [19]:

$$K_S = \frac{S(L_{MIN} + L_D)}{S[L_{MIN}]} \propto \left(\frac{L_{MIN}}{L_{MIN} + L_D} \right)^3$$

Ефективним способом відображення цієї функції та оптимізації апаратно-програмних систем магнітного трекінгу є векторне представлення, приклад якого наведено на рис. 3. Характеристичні вектори \vec{L}_S відкладаються на діаграмі наступним чином. Проекція вектора \vec{L}_S на вісь X відображає діапазон вимірювання L_D , а на вісь Y – спад сигналу K_S в логарифмічному масштабі відносно нормованого значення на мінімальній $K_{S(L_{MIN})} = 1$. Відтак, сімейства таких векторів візуально відображають спадання сигналу $K_{S(L_{MIN}, L_D)}$ для певних наборів значень мінімальної відстані L_{MIN} та діапазону вимірювання L_D .

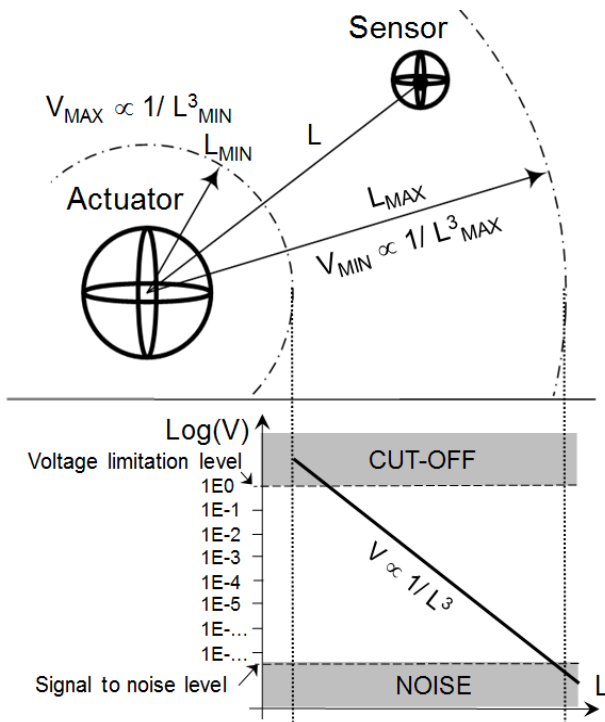


Рис. 2. Граничні відстані в сенсорних пристроях магнітного трекінгу

Зокрема, при $L_{\text{MIN}} = 1$ см та $L_D = 90$ см спадання сигналу відносно нормованого значення становить приблизно шість порядків $K_S \approx 1\text{E-}6$. Натомість, при збільшенні мінімальної відстані до $L_{\text{MIN}} = 10$ см спадання сигналу при тому ж значенні діапазону вимірювання $L_D = 90$ см становить приблизно три порядки $K_S \approx 1\text{E-}3$. Використання діаграми характеристичних векторів \vec{L}_S суттєво прискорює процес пошуку оптимальних значень L_{MIN} та L_D за критерієм спадання сигналу $K_S(L_{\text{MIN}}, L_D)$.

Якщо взяти до уваги компоненту зміни взаємних кутів у парі індуктивних котушок «актюатор – сенсор» та компоненту зміни відстаней у

цій парі котушок, вимірювальний тракт сенсорів магнітного трекінгу повинен забезпечувати максимально можливий динамічний діапазон – здебільшого, не менше шести порядків.

Дамо аналіз можливостей щодо реалізації широкого динамічного діапазону вимірювального тракту в пристроях магнітного трекінгу. З точки зору сучасних апаратно-програмних засобів сенсорної електроніки, така реалізація може базуватися на двох основних методах.

Перший метод базується на цифровій техніці та передбачає використання аналого-цифрових перетворювачів з гранично можливою роздільною здатністю та лінійністю функції перетворення. Реалізацію такого перетворення можна здійснити на високопрецизійних мікроконвертерах з аналого-цифровим перетворювачем та вхідними програмно-керованими колами аналогового фронт-енду, зокрема, MicroConverter ADuC834 з роздільною здатністю 24 біт [21].

Однак, необхідно врахувати дві важливі обставини. По-перше, реальна роздільна здатність 24-бітних перетворювачів з урахуванням шумових процесів не перевищує 21 біт за середньоквадратичним RMS (Root Mean Square) відхиленням та 18 біт за миттєвими P-P (Peak-to-Peak) значеннями. По-друге, швидкодія перетворювачів такого типу є надто низькою – не більше п'яти вимірювань при зазначеній роздільній здатності. Для розуміння обмеження швидкодії сигнального перетворення в системах магнітного трекінгу на основі цифрових методів необхідно враховувати природу електромагнітних завад в сенсорних котушках. Зокрема, на рис. 4 представлено приклад експериментального дослідження сигналу сенсорної котушки на граничній відстані L_{MAX} при коефіцієнті підсилення $K_V = 1000$.

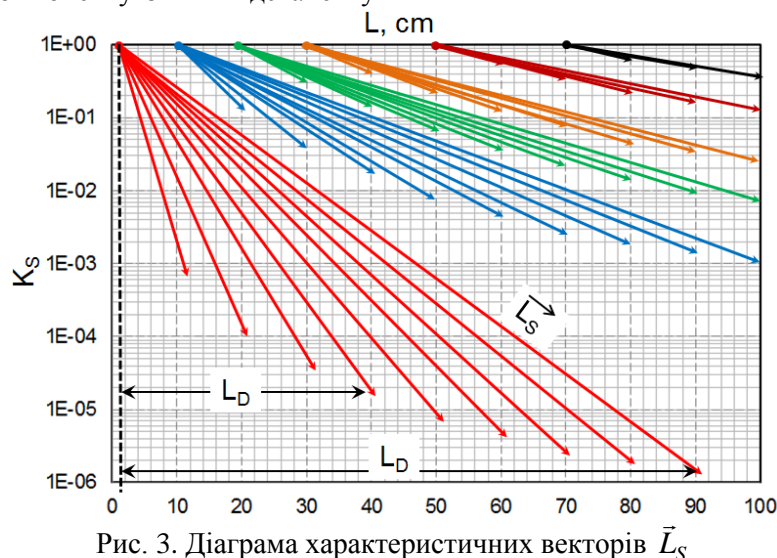


Рис. 3. Діаграма характеристичних векторів \vec{L}_S

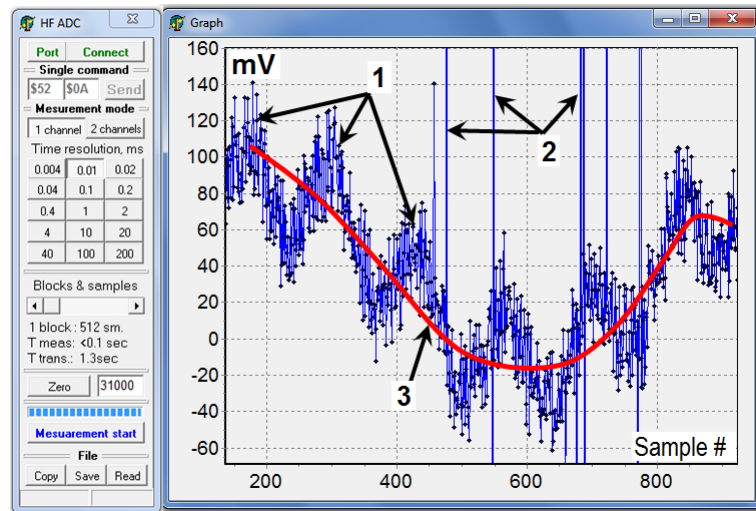


Рис. 4. Аналоговий сигнал сенсора магнітного трекінгу

Результати отримані з допомогою швидкодіючих аналого-цифрових перетворювачів SAR (Successive Approximation Register) програмованої системи на кристалі PSoC 5LP (Cypress Semiconductor) [22], більш детальна інформація про яку буде представлена далі. Прийнято наступні позначення: Sample # – номер вимірювання; 1 – корисний сигнал з компонентами високочастотного спектру електромагнітної завади та власного шуму підсилювача; 2 – імпульсна електромагнітна завада ключових схем, блоків живлення чи інтерфейсів; 3 – отриманий усередненням сигналу рівень завади, обумовленої електромагнітним випромінюванням силової мережі живлення 50 Гц. Проблема полягає в наступному. Такі складові, як шум сигнального кола, високочастотні та імпульсні завади, можуть ефективно гаситися фільтрами чи інтеграторами сигналу за певний проміжок часу. При цьому проміжок часу інтегрування сигналу цих складових, здебільшого, не перевищує 0,1 мс. Однак, завада, обумовлена електромагнітним випромінюванням силової мережі живлення 50 Гц обумовлює необхідність інтегрування сигналу протягом періоду часу від 20 мс (гірший варіант вимірювання при інтегруванні за один період завади) до 200 мс (оптимальна тривалість з точки зору максимальної ефективності вимірювання). Таким чином, створення багатоканальних сигнальних перетворювачів систем магнітного трекінгу при вказаній оптимальній тривалості інтегрування є неможливим. В залежності від призначення системи кількість каналів аналогового фронт-енду становить від 3 при одній точці трекінгу на одній сенсорній 3D котушці і до 30 при десяти 3D котушках, зокрема, в системі трекінгу руху людини (по дві на кожній кінцівці, а також на голові).

Другий метод базується на комбінованих алгоритмах з попередньою аналоговою компресією сигналу. Такі алгоритми передбачають декілька послідовних стадій перетворення. На першій стадії проводиться підсилення сигналу з одночасним його аналоговим логарифмуванням. На другій стадії проводиться аналого-цифрове перетворення з використанням схем аналого-цифрового перетворення, що є оптимізованими з точки зору реалізації енергоефективних сенсорів магнітного трекінгу. На подальших стадіях перетворення використовують відповідні алгоритми цифрової декомпресії сигналу з компенсацією параметричної та температурної нестабільності аналогового тракту. Ефективним рішенням аналогової компресії сигналу є логарифмуючі каскади на операційних підсилювачах з діодами на напівпровідникових p-n переходах [23].

Відповідно до вищезгаданого методу з попередньою аналоговою компресією сигналу, в даній роботі представлені результати дослідження та аналізу параметрів логарифмуючих підсилювачів. Використання таких логарифмуючих підсилювачів вирішує проблему розширення динамічного діапазону вимірювальних перетворювачів сенсорів магнітного трекінгу.

При цьому важливим є не лише сам принцип логарифмуючої компресії, але і специфіка його реалізації в системах магнітного трекінгу. По-перше, необхідно оптимізувати діапазон компресії сигналу. Так, логарифмувати напруги в діапазоні нижче певного порогового рівня V_{TH} , зокрема при $V_{TH} < 10$ мВ, є недоцільно з точки зору втрати чутливості вимірювання при значній відстані між сенсором та актюатором. З урахуванням цього, в діапазоні малих напруг необхідно проводити лінійне підсилення сигналів з мінімальним впливом інших вузлів сигнального перетво-

рення, а логарифмуюче перетворення використовувати лише в діапазоні вищезгаданого порогового рівня напруги V_{TH} . По-друге, в системах магнітного трекінгу схеми компресії повинні забезпечувати симетричне логарифмування в двох полярностях сигналу, що не дозволяє використовувати серійні інтегральні схеми компресії, зокрема, транслінійні логарифмічні конвертери (Translinear Logarithmic Converter) типу ADL5303 компанії Analog Devices. Відтак, необхідним етапом розроблення систем магнітного трекінгу є параметричний аналіз схем логарифмуючих підсилювачів.

3. Принцип та схемотехніка логарифмуючого підсилення

Аналогову компресію сигналу здійснюють схемами логарифмуючих підсилювачів, коло від'ємного зворотного зв'язку яких містить компоненти з нелінійною вольт-амперною характеристикою. Здебільшого, такими компонентами є діоди чи біполярні транзистори в діодному включенні. Їхня характеристика визначається експоненціальною залежністю струму від прикладеної до р-n переходу напруги в прямому змщенні [22]:

$$I_{pn} = I_S \cdot \left(e^{\frac{V_{pn}}{N\phi_T}} - 1 \right),$$

де I_{pn} та V_{pn} – струм через р-n перехід та падіння напруги на ньому; I_S та N – струм насичення та безрозмірний коефіцієнт неідеальності (Nonideality factor) р-n-переходу; $\phi_T = kT/q$ – температурний потенціал (у вольтах); k – постійна Больцмана; q – заряд електрона; T – абсолютна термодинамічна температура (в кельвінах, К).

Для реалізації двополярного логарифмування вхідної напруги V_{IN} використовують схеми на основі операційних підсилювачів (рис. 5). У таких схемах вхідне лінійне перетворення «напруга V_{IN} – струм I_R » реалізують на резисторі R_1 , а подальше логарифмуюче перетворення «струм I_R – напруга V_{OUT} » – в колі від'ємного зворотного зв'язку на парі паралельно ввімкнених діодів D_1 , D_2 (рис. 5, а) чи транзисторів T_1 , T_2 в діодному включенні (рис. 5, б). Крім того, паралельно до такої пари вмикають високоомний резистор R_2 , функція якого полягає в стабілізації початкових струмів схеми логарифмування та оптимізації діапазону логарифмування.

Більшу гнучкість щодо керування параметрами логарифмуючого компресування сигналу забезпечують модифіковані схеми з допоміжними резистивними подільниками (рис. 6). Резистивні подільники цих схем масштабують логарифмічні вольт-амперні характеристики емітерних р-n переходів біполярних п-р-п та р-п-р транзисторів. Суттєвою перевагою схем з подільниками є можливість розширення діапазону вихідної напруги логарифмуючих підсилювачів та оптимізації переходу між лінійною та логарифмічною ділянками підсилення. В першій зі схем (рис. 6, а) використовується два подільники – R_2 - R_3 для п-р-п транзистора T_1 та R_4 - R_5 для р-п-р транзистора T_2 . Таке рішення забезпечує можливість незалежного масштабування в колах кожного з транзисторів. Натомість у другій схемі (рис. 6, б) використовується спільний подільник R_2 - R_3 для п-р-п та р-п-р транзисторів. Резистор R_4 стабілізує початкові струми кола зворотного зв'язку та забезпечує можливість керування переходу між лінійною, квазілінійною та логарифмічною ділянками підсилення. В цілому, параметри цих двох схем є практично тотожними, а тому обмежимося аналізом параметрів лише однієї схеми – логарифмуючого підсилювача зі спільним подільником (рис. 6, б).

Резистор R_4 стабілізує початкові струми кола зворотного зв'язку та забезпечує можливість керування переходу між лінійною, квазілінійною та логарифмічною ділянками підсилення. В цілому, параметри цих двох схем є практично тотожними, а тому обмежимося аналізом параметрів лише однієї схеми – логарифмуючого підсилювача зі спільним подільником (рис. 6, б).

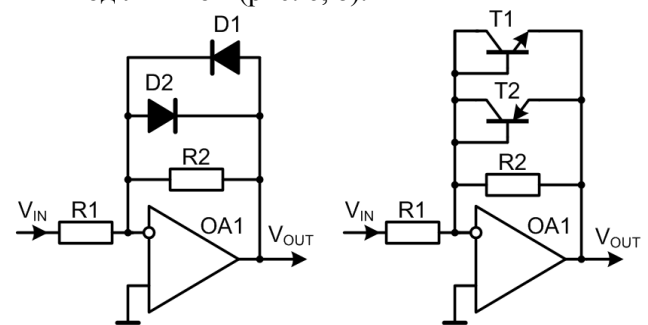


Рис. 5. Елементарні схеми логарифмуючих підсилювачів

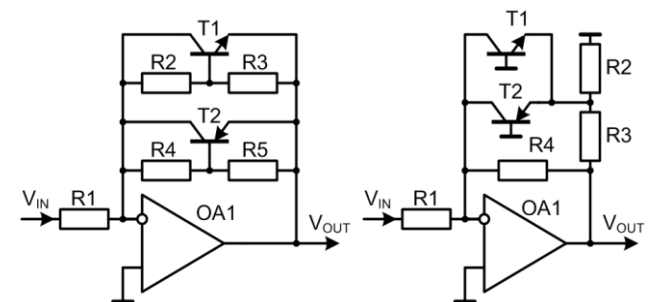


Рис. 6. Модифіковані схеми логарифмуючих підсилювачів

4. Принцип функціонування та проблематика систем магнітного трекінгу

Моделльні дослідження проводилися на основі математичних SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) моделей у програмному середовищі MICRO-CAP 11 [24]. Наведені далі результати модельних досліджень характеризуються комплексним підходом, в якому отримують сімейства передавальних характе-

ристик логарифмуючих підсилювачів при певних наборах параметрів резистивних подільників.

Такі дослідження проводилися з використанням методу Stepping, що передбачає можливість зміни значення параметрів компонент з

представленням результатів у вигляді сімейств характеристик. Схема логарифмуючого підсилювача та приклад встановлення параметрів у вікні специфікації Stepping представлені на рис. 7.

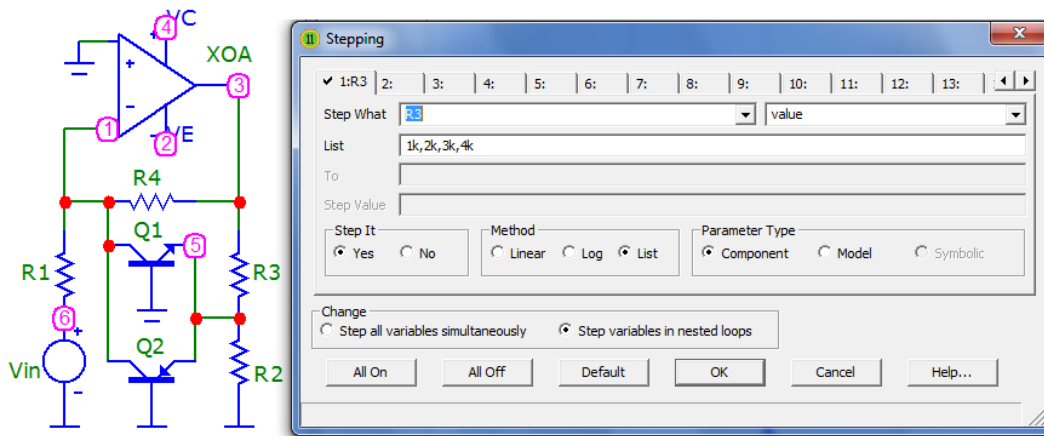


Рис. 7. Схема логарифмуючого підсилювача та вікно специфікації Stepping

У даному прикладі отримують сімейство (List) характеристик для чотирьох значень (Value) певної компоненти (Component), а саме опору резистора R3 (Ohm) = 1E3, 2E3, 3E3 та 4E3.

Отримані сімейства (Case #N) передавальних характеристик, в яких відображені залежності вихідної напруги V_{OUT} (V) від вхідної напруги V_{IN} (V):

- Case #1 – зміна опору R3 (Ohm) = 1E3 (1), 2E3 (2), 3E3 (3), 4E3 (4) при R2 = 5E2, R4 = 1E7 в діапазоні вхідної напруги від V_{IN} (V) = -1E-2 до 1E-2 (рис. 8);

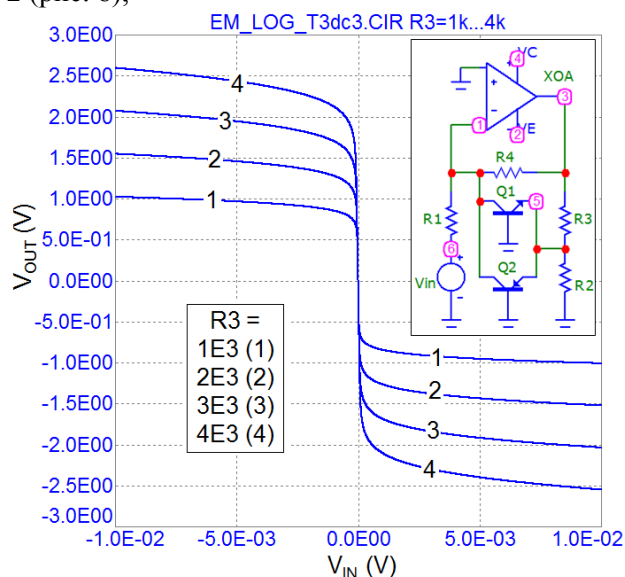


Рис. 8. Сімейство передавальних характеристик Case #1

- Case #2 – аналогічно Case #1 в діапазоні малих значень вхідної напруги від V_{IN} (V) = -1E-4 до 1E-4 (рис. 9);

- Case #3 – аналогічно Case #1 в логарифмічному масштабі абсолютних значень $ABS(V_{IN})$ вхідної напруги від V_{IN} (V) = 1E-6 до 1E-1 (рис. 10);

- Case #4 – зміна опору R4 (Ohm) = 1E5 (1), 1E6 (2), 1E7 (3), 1E9 (4) при R3 = 5E2, R4 = 1E7 в діапазоні вхідної напруги від V_{IN} (V) = -1E-2 до 1E-2 (рис. 11);

- Case #5 – аналогічно Case #4 в логарифмічному масштабі абсолютних значень $ABS(V_{IN})$ вхідної напруги від V_{IN} (V) = 1E-6 до 1E-1 (рис. 12).

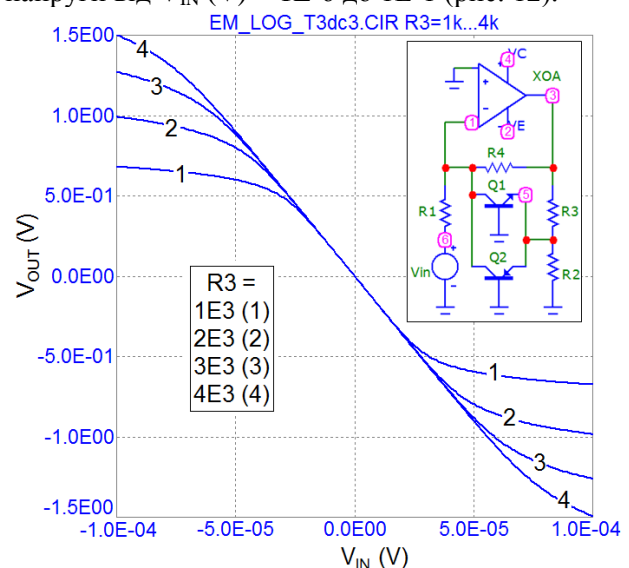


Рис. 9. Сімейство передавальних характеристик Case #2

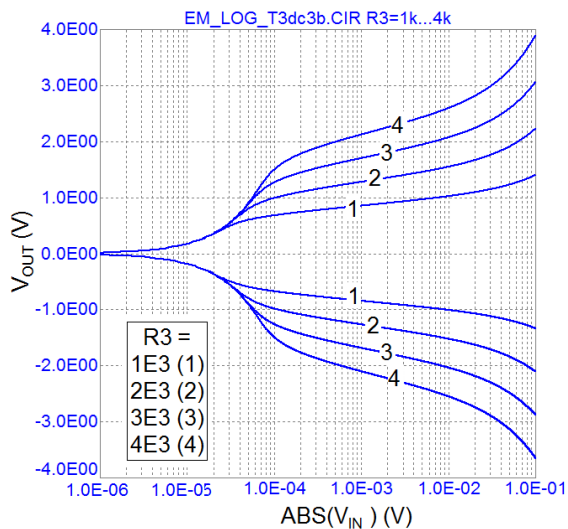


Рис. 10. Сімейство передавальних характеристик Case #3

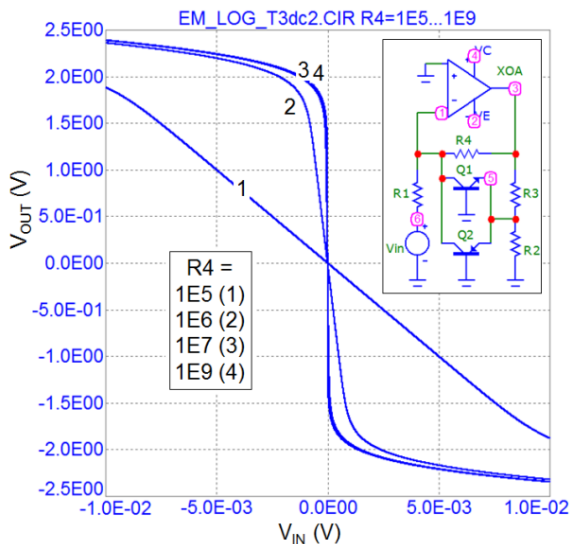


Рис. 11. Сімейство передавальних характеристик Case #4

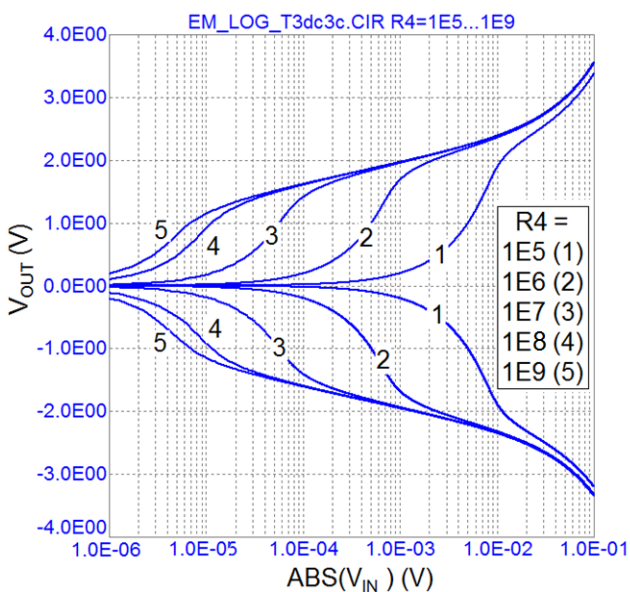


Рис. 12. Сімейство передавальних характеристик Case #5

Результати таких досліджень забезпечують можливість аналізу впливу параметрів кола зворотного зв'язку на діапазон вихідної напруги, а також, перехід між ділянками лінійного, квазілінійного та логарифмічного підсилення. Відтак, представляється можливим оптимізувати параметри логарифмуючого підсилювача, як з точки зору компромісу між діапазоном вимірювання в логарифмічній ділянці передавальної характеристики, так і співвідношенням корисного сигналу до шуму в лінійній (квазілінійній) ділянці.

Крім того, важливим є виявлення закономірностей впливу на характеристики логарифмуючих підсилювачів параметрів транзисторів та температури. Приклади таких досліджень представлені сімействами передавальних характеристик:

- Case #6 – зміна коефіцієнта неідеальності емітерного р-п-переходу транзистора (для зменшення обсягу викладеного матеріалу розглядається лише один параметр \$GENERIC_P.NF моделі біполярного р-п-р транзистора) NF = 1,1 (1), 1,2 (2), 1,3 (3) при аналогічних до Case #1 опорах резисторів (рис. 13);

- Case #7 – зміна температури $t(^{\circ}\text{C}) = -25$ (1), 0 (2), 25 (3), 50 (4) при аналогічних до Case #1 опорах резисторів (рис. 14).

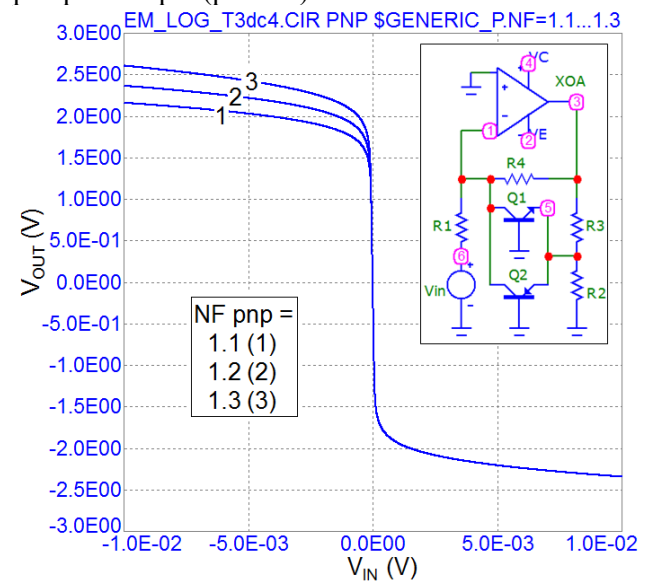


Рис. 13. Сімейство передавальних характеристик Case #6

Завершальним етапом модельних досліджень є отримання сімейств епюр сигналів, для формування яких використовується джерело синусоїдальної напруги V_{IN} . Приклад таких досліджень для чотирьох значень вхідної напруги V_{IN} (V) = 1E-5 (1), 1E-4 (2), 1E-3 (3), 1E-2 (4), представлено на рис. 15 (по осі X відображено час в секундах – Time(s)).

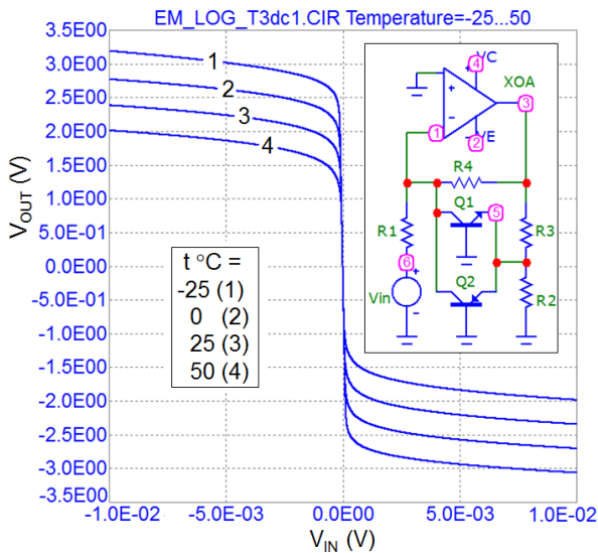


Рис. 14. Сімейство передавальних характеристик Case #7

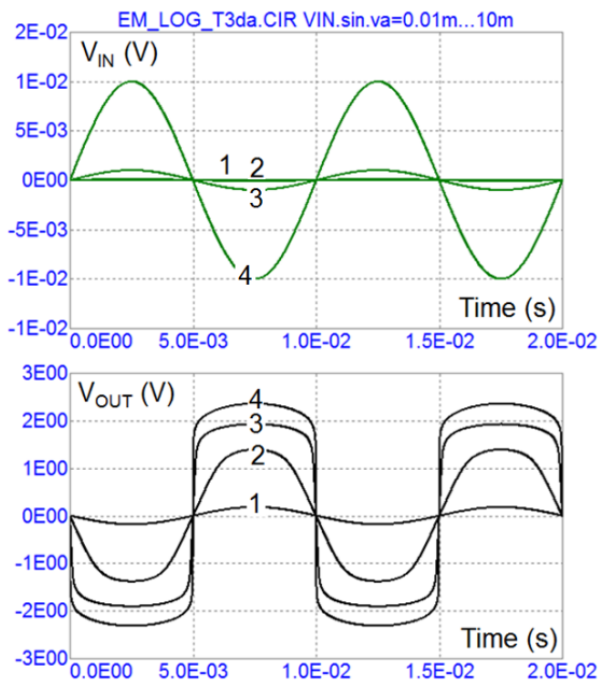


Рис. 15. Сімейство передавальних характеристик Case #8

Цим прикладом наочно демонструється ефект компресії сигналу та залежність коефіцієнта передачі сигналу від його рівня. Для спрощення представлено епюри лише для чотирьох сигналів, значення амплітуди вхідної синусоїдальної напруги яких зростає на порядок. Так, перше значення вхідної напруги V_{IN} (V) = $1E-5$ (1) знаходиться в межах лінійної ділянки підсилення. Друге значення V_{IN} (V) = $1E-4$ (2) є перехідним і знаходиться в ділянці квазілінійного підсилення сигналу. На епюрах вхідних сигналів (зверху) ці значення напруги взагалі не проявляються у співставленні з наступними двома значеннями на-

пруги – V_{IN} (V) = $1E-3$ (3), $1E-2$ (4). Ці значення знаходяться в ділянці логарифмуючого підсилення. Відтак, такий тип досліджень якісно демонструє ефект компресії сигналу.

5. Реалізація та апробація

Реалізація та апробація отриманих результатів модельних досліджень здійснена з використанням вищезгаданих інтегрованих апаратно-програмних засобів магнітного трекінгу MTS IDE. Фрагмент схеми сигнального перетворювача MTS IDE наведено на рис. 16, а фото його дослідного зразка – на рис. 17. Основою сигнального перетворювача є програмована система на кристалі PSoC 5LP (Cypress Semiconductor) [22], зокрема, її програмно керовані компоненти: Opamp – операційний підсилювач; ADC_SAR – аналого-цифровий перетворювач типу SAR (Successive Approximation Register); UART – універсальний послідовний інтерфейс типу UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter).

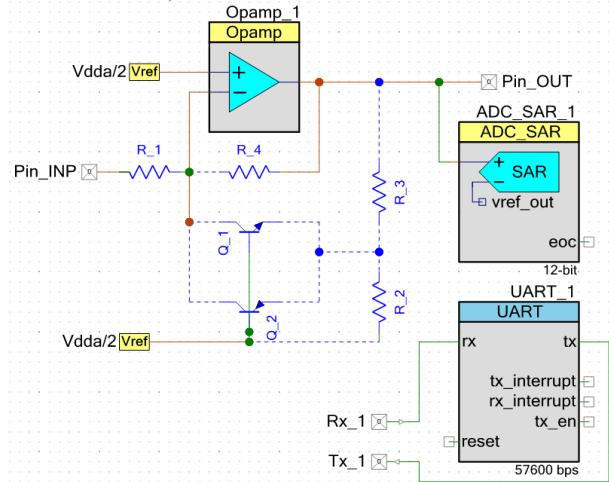


Рис. 16. Фрагмент схеми сигнального перетворювача

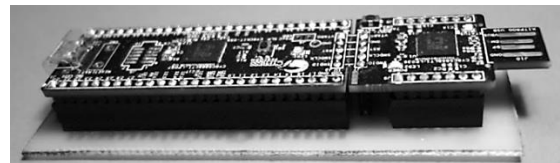


Рис. 17. Фото дослідного зразка сигнального перетворювача

Компоненти PSoC конфігуруються та динамічно програмується з використанням API функцій. Для прикладу на рис. 18 демонструється вікно конфігурування компоненти ADC_SAR, в якому встановлюється роздільна здатність (Resolution), швидкість аналого-цифрового перетворення (Conversion rate), діапазон вхідних напруг (Input range), спосіб формування опорної напруги (Reference), режим вимірювання (Sample mode: Free running, Software trigger, Hardware

trigger, джерело тактових сигналів (Clock source – Internal, External) тощо.

У дослідний зразок розробленого сигнального перетворювача входять дві плати – плата модуля CY8CKIT-059 на основі серії PSoC 5LP CY8C58xxLP та монтажна плата з зовнішніми компонентами – транзисторами та резисторами кола зворотного зв'язку логарифмуючого підсилювача. Використані комплементарні спарені транзистори BC817DPN (Nexperia) (рис. 19).

Для динамічного конфігурування та керування процесом вимірювання розроблено програмне забезпечення. Приклад отриманого результату вимірювання передавальної характеристики логарифмуючого підсилювача наведено на рис. 20. По осі X відображено порядковий номер вимірювання # INP (від 1 до 100) при зміні в кожному наступному вимірюванні вхідної напруги від $V_{IN} = -10$ мВ до $V_{IN} = 10$ мВ з кроком 0,2 мВ. По осі Y відображено вихідну напругу логарифмуючого підсилювача V_{OUT} , мВ. Експериментальні дослідження в цілому підтверджують коректність запропонованих рішень та моделей.

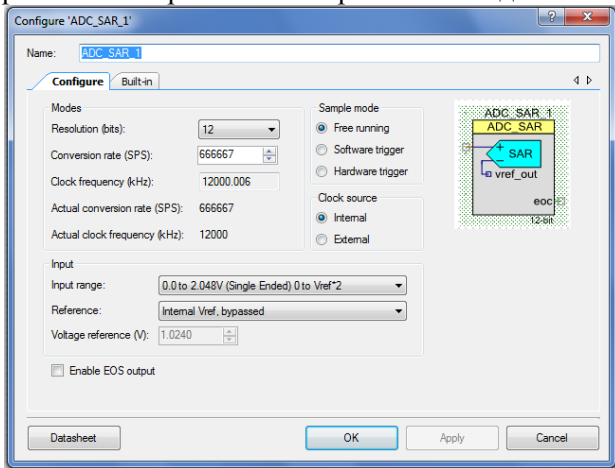


Рис. 18. Вікно конфігурування компоненти ADC_SAR


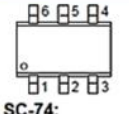
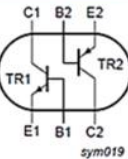
 BC817DPN NPN/PNP general purpose transistor 27 November 2019				
Pin	Symbol	Description	Simplified outline	Graphic symbol
1	E1	emitter TR1	 SC-74; TSOP6 (SOT457)	 sym019
2	B1	base TR1		
3	C2	collector TR2		
4	E2	emitter TR2		
5	B2	base TR2		
6	C1	collector TR1		

Рис. 19. Коротка специфікація комплементарних спарених транзисторів BC817DPN

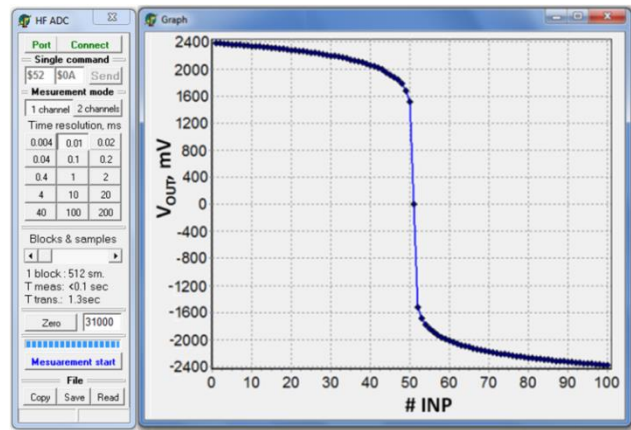


Рис. 20. Результат експериментального дослідження передавальної характеристики

Результати вимірювань використовуються для уточнення параметрів вищезгаданих SPICE моделей. Крім того, отримані числові значення передавальної характеристики використовуються для створення масиву коефіцієнтів реалізованої цифровими методами декомпресії сигналів системи магнітного трекінгу.

Ефективність використання логарифмуючого підсилювача в системі магнітного трекінгу показано на рис. 21. Порівнюються форми сигналів у двох режимах вимірювання: 1 – без логарифмування # INP від 1 до 50 та 2 – з логарифмуванням # INP від 51 до 100. Перехід між цими режимами позначено s.

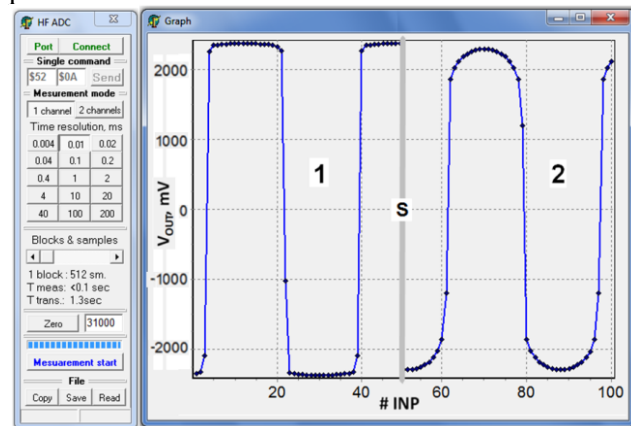


Рис. 21. Результат експериментального дослідження епіюр сигналів

Можна бачити, що в першому режимі вимірювання має місце втрата інформативності сигналу внаслідок його обмеження за амплітудою на рівнях $\approx \pm 2,3$ В. Натомість у другому режимі використання логарифмуючого підсилювача запобігає такому обмеженню, забезпечуючи при значних рівнях сигналу його ефективну компресію. Це дозволяє розширити просторову зону магнітного трекінгу при забезпеченні високої роздільної здатності вимірювання сигналу.

Висновки

У роботі представлено результати дослідження сигнальних перетворювачів сенсорних пристроїв магнітного трекінгу. Метод магнітного трекінгу базується на визначенні просторового положення об'єктів за результатами вимірювання вектора індукції опорних магнітних полів. Показано, що основною проблемою реалізації сенсорних пристроїв магнітного трекінгу є необхідність вимірювання сигналів у широкому динамічному діапазоні. Проведено аналіз можливостей вирішення даної проблеми цифровими та більш ефективними комбінованими методами. Останні базуються на підсиленні сигналу з аналоговою компресією, що здійснюється схемами логарифмуючих підсилювачів, коло від'ємного зворотного зв'язку яких містить компоненти з нелінійною вольт-амперною характеристикою.

Показано, що керування параметрами логарифмуючої компресії сигналу забезпечують модифіковані схеми з допоміжними резистивними подільниками, що масштабують логарифмічні вольт-амперні характеристики емітерних р-п переходів біполярних р-р-р та р-п-р транзисторів. Суттєвою перевагою схем з подільниками є можливість розширення діапазону вихідної напруги логарифмуючих підсилювачів та оптимізації переходу між лінійною та логарифмічною ділянками підсилення. Представлені результати модельних та експериментальних досліджень логарифмуючого підсилювача системи магнітного трекінгу. Модельні дослідження проводилися на основі математичних SPICE моделей. Вони характеризуються комплексним підходом, в якому отримують сімейства передавальних характеристик логарифмуючих підсилювачів за певних наборів параметрів резистивних подільників. Реалізація та апробація отриманих результатів модельних досліджень здійснена з допомогою інтегрованих апаратно-програмних засобів магнітного трекінгу MTS IDE. Основою сигнального перетворювача є програмована система на кристалі PSoC 5LP. Компоненти PSoC конфігуруються та динамічно програмуються з використанням API функцій.

Список використаної літератури

1. A novel method of motion tracking for virtual reality using magnetic sensors [Text] / W. Hongtao, Y. Zhimin, Y. Ping // 2018 Asia-Pacific Magnetic Recording Conference (APMRC): proceedings, Shanghai, November 15 – 17 2018.
2. Singh, M. High-definition wireless personal area tracking using AC magnetic field for virtual reality [Text] / M. Singh and B. Jung // 2017 IEEE Virtual Reality (VR). – 2017.
3. Fedasyuk, D. A tester of the MEMS accelerometers operation modes [Text] / D. Fedasyuk, R. Holyaka, T. Marusenkova // Advanced Information and Communications Technologies (AICT): proceedings of the 3rd intern. conf., July 3 – 6 2019 / Lviv Polytechnic National University. – Lviv, 2019.
4. Fedasyuk, D. Method of analyzing dynamic characteristics of MEMS gyroscopes in test measurement mode [Text] / D. Fedasyuk, R. Holyaka, T. Marusenkova // Advanced Computer Information Technologies (ACIT): proceedings of the 9th intern. conf., June 5 – 7 2019 / University of South Bohemia. – Ceske Budejovice, 2019. – P. 157–160
5. Kim, W. Closed-form position and orientation estimation for a three-axis electromagnetic tracking system [Text] / W. Kim, J. Song, F. Park // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – 65(5). – P.4331–4337. DOI: 10.1109/tie.2017.2760
6. He, H. The development of an EM-field probing system for manual near-field scanning [Text] / H. He, P. Maheshwari, D. Pommerenke // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – 58(2). – P. 356–363. DOI: 10.1109/temc.2015.2496376
7. Sadjadi, H. Simultaneous electromagnetic tracking and calibration for dynamic field distortion compensation [Text] / H. Sadjadi, K. Hashtrudi-Zaad, G. Fichtinger // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2016. – 63(8). – P. 1771–1781. DOI: 10.1109/tbme.2015.2502138
8. Sharp, I. Positional accuracy measurement and error modeling for mobile tracking [Text] / I. Sharp, K. Yu, T. Sathyan // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2012. – 11(6). – P. 1021–1032. DOI: 10.1109/tmc.2011.119
9. Jo, D. ARIOT: scalable augmented reality framework for interacting with Internet of Things appliances everywhere [Text] / D. Jo, G. Kim // IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 2016. – 62(3). – P.334–340. DOI: 10.1109/tce.2016.7613201
10. Reichl, T. Electromagnetic servoing – a new tracking paradigm [Text] / T. Reichl, J. Gardiazabal, N. Navab // IEEE Transactions on Medical Imaging. – 2013. – 32(8). – P. 1526–1535. DOI: 10.1109/tmi.2013.2259636
11. Electromagnetic tracking in medicine – a review of technology, validation, and applications [Text] / A. Franz, T. Haidegger, W. Birkfellner et al. // IEEE Transactions on Medical Imaging. – 2014. – 33(8). – P.1702–1725. DOI: 10.1109/tmi.2014.2321777
12. An MEG-compatible electromagnetic-tracking system for monitoring orofacial kinematics [Text] / N. Alves, C. Jobst, F. Hotze et al. // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2016. –

63(8). – P. 1709–1717. DOI: 10.1109/tbme.2015.2500102

13. Electromagnetic positioning for tip tracking and shape sensing of flexible robots [Text] / S. Song, Z. Li, H. Yu, H. Ren // *IEEE Sensors Journal*. – 2015. – 15(8). – P. 4565–4575. DOI: 10.1109/jsen.2015.2424228

14. VR EM Motion Tracking Systems & Applications [Text] / E. Pérez, A. Cuevas, C. Cabeza [et al.]. – Málaga: PREMO S.L., 2017. – 224 p.

15. Matthews, A. VR 3D electromagnetic motion tracking sensor [Electronic resource]. – Regime of access: <https://www.electronicsspecifier.com/sensors/vr-3d-electromagnetic-motion-tracking-sensor#downloads>

16. Skog, I. Inertial and magnetic-field sensor arrays – capabilities and challenges [Text] / I. Skog // *IEEE SENSORS: proceedings of 2018 conf*, New Delhi, October 28 – 31 2018.

17. A novel 6-D tracking method by fusion of 5-D magnetic tracking and 3-D inertial sensing [Text] / H. Dai, S. Song, C. Hu et al. // *IEEE Sensors Journal*. – 2018. – 18(23). – P. 9640–9648. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2872650

18. Premo 3DV06 Datasheet [Electronic resource]. – Regime of access: <https://3dcoil.grupopremo.com>

19. Ripka, P. Magnetic tracker with high precision [Text] / P. Ripka, A. Zikmund // *Procedia Engineering*. – 2011. – 25. – P. 1617–1620.

20. AD8601/AD8602/AD8604. Precision CMOS Single-Supply Rail-to-Rail Input/Output Wideband Operational Amplifiers [Electronic resource]. – Regime of access: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8601_8602_8604.pdf

21. ADuC834. MicroConverter, Dual ADCs with Embedded Flash MCU [Electronic resource]. – Regime of access: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADUC834.pdf>

22. PSoC® 5LP: CY8C52LP Family Datasheet: Programmable System-on-Chip [Electronic resource]. – Regime of access: <http://www.cypress.com/documentation/datasheets/psoc-5lp-cy8c52lp-family-datasheet-programmable-system-chip-psoc>

23. Jaeger, R. Micro-electronic circuit design [Text] / R. Jaeger, T. Blalock. – McGraw-Hill Education, 2016. – 1355 p.

24. MICRO-CAP 11. Electronic Circuit Analysis Program. Reference Guide [Electronic resource]. – Regime of access: <http://www.spectrum-soft.com>

References

1. Hongtao, W., Zhimin, Y., Ping, W., Santoso, B. and Lian, O. (2018), “A novel method of

motion tracking for virtual reality using magnetic sensors”, *Proceedings of the 2018 Asia-Pacific Magnetic Recording Conference (APMRC)*, November 15 – 17, Shanghai, 2018. DOI: 10.1109/APMRC.2018.8601108

2. Singh, M. and Jung, B. (2017), “High-definition wireless personal area tracking using AC magnetic field for virtual reality”, *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*. DOI: 10.1109/VR.2017.7892250

3. Fedasyuk, D., Holyaka, R. and Marusenkova, T. (2019), “A tester of the MEMS accelerometers operation modes”, *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, July 3 – 6, 2019. DOI: 10.1109/AIACT.2019.8847840

4. Fedasyuk, D., Holyaka, R. and Marusenkova, T. (2019), “Method of analyzing dynamic characteristics of MEMS gyroscopes in test measurement mode”, *Proceedings of the 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Ceske Budejovice, June 5–7, 2019, pp. 157–160. DOI: 10.1109/ACITT.2019.8780058

5. Kim, W., Song, J. and Park F. (2018), “Closed-form position and orientation estimation for a three-axis electromagnetic tracking system”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(5), pp. 4331–4337. DOI: 10.1109/tie.2017.2760244

6. He, H., Maheshwari, P. and Pommerenke, D. (2016), “The development of an EM-field probing system for manual near-field scanning”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 58(2), pp. 356–363. DOI: 10.1109/temc.2015.2496376

7. Sadjadi, H., Hashtrudi-Zaad, K. and Fichtinger, G. (2016), “Simultaneous electromagnetic tracking and calibration for dynamic field distortion compensation”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 63(8), pp. 1771–1781. DOI: 10.1109/tbme.2015.2502138

8. Sharp, I., Yu, K. and Sathyan, T. (2012), “Positional accuracy measurement and error modeling for mobile tracking”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 11(6), pp. 1021–1032. DOI: 10.1109/tmc.2011.119

9. Jo, D. and Kim, G. (2016), “ARIoT: scalable augmented reality framework for interacting with Internet of Things appliances everywhere”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 62(3), pp. 334–340. DOI: 10.1109/tce.2016.7613201

10. Reichl, T., Gardiazabal, J. and Navab, N. (2013), “Electromagnetic servoing – a new tracking paradigm”, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 32(8), pp. 1526–1535. DOI: 10.1109/tmi.2013.2259636

11. Franz, A., Haidegger, T., Birkfellner, W., Cleary, K., Peters, T. and Maier-Hein, L. (2014), "Electromagnetic tracking in medicine – a review of technology, validation, and applications", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 33(8), pp.1702–1725. DOI: 10.1109/tmi.2014.2321777
12. Alves, N., Jobst, C., Hotze, F., Ferrari, P., Lalancette, M., Chau, T., van Lieshout, P. and Cheyne, D. (2016), "An MEG-compatible electromagnetic-tracking system for monitoring orofacial kinematics", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 63(8), pp. 1709–1717. DOI: 10.1109/tbme.2015.2500102
13. Song, S., Li, Z., Yu, H. and Ren, H. (2015), "Electromagnetic positioning for tip tracking and shape sensing of flexible robots", *IEEE Sensors Journal*, 15(8), pp. 4565–4575. DOI: 10.1109/jsen.2015.2424228
14. Pérez, E., Cuevas, A., Cabeza, C., Morilla, A., Reyes, S., Sillero, A. García, J., Mahiques, L. (2017), VR EM Motion Tracking Systems & Applications, PREMO S.L., Málaga, Spain.
15. Matthews, A. (2017), "VR 3D electromagnetic motion tracking sensor", available at: <https://www.electronicsspecifier.com/sensors/vr-3d-electromagnetic-motion-tracking-sensor#downloads>
16. Skog, I. (2018), "Inertial and magnetic-field sensor arrays – capabilities and challenges", *Proceedings of 2018 IEEE SENSORS*, New Delhi, India, DOI: 10.1109/icsens.2018.8589760
17. Dai, H., Song, S., Hu, C., Sun, B. and Lin, Z. (2018), "A novel 6-D tracking method by fusion of 5-D magnetic tracking and 3-D inertial sensing", *IEEE Sensors Journal*, 18(23), pp. 9640–9648. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2872650
18. Premo 3DV06 Datasheet (2018), available at <https://3dcoil.grupopremo.com> (accessed December 10 2019).
19. Ripka, P., Zikmund, A. (2011), "Magnetic tracker with high precision", *Procedia Engineering*, Vol. 25, pp. 1617–1620.
20. AD8601/AD8602/AD8604. Precision CMOS Single-Supply Rail-to-Rail Input/Output Wideband Operational Amplifiers (2011), available at https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8601_8602_8604.pdf (accessed December 16 2019).
21. ADuC834. MicroConverter, Dual ADCs with Embedded Flash MCU (2016), available at <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADUC834.pdf> (accessed December 16 2019).
22. Cypress Semiconductor Corporation. (2019), PSoC® 5LP: CY8C52LP Family Datasheet: Programmable System-on-Chip, available at <http://www.cypress.com/documentation/datasheets/p-soc-5lp-cy8c52lp-family-datasheet-programmable-system-chip-psoc> (accessed December 12 2019).
23. Jaeger, R. and Blalock, T. (2016), *Microelectronic Circuit Design*, McGraw-Hill Education.
24. Spectrum Software (2017), MICRO-CAP 11. Electronic Circuit Analysis Program. Reference Guide, available at <http://www.spectrum-soft.com> (accessed April 13 2019).

LOGARITHMIC AMPLIFIERS FOR SOFTWARE-HARDWARE MAGNETIC TRACKING SYSTEMS

R. L. Holyaka, T. A. Marusenkova, D. V. Fedasyuk

Lviv Polytechnic National University

Abstract. *The work deals with the problem of signal conversion in magnetic tracking devices. Magnetic tracking technology is based on computing the spatial position of an object being tracked upon measuring reference magnetic fields in low-frequency electromagnetic radiation spectrum. Magnetic tracking devices are key components of navigation sensors for virtual and augmented reality. It has been shown that the main problem one faces when developing sensory devices for magnetic tracking is the fact that signals should be measured in a wide measurement range. We have analyzed possible ways to solve the stated problem by digital and combined methods. The latter have proven to be more efficient. They consist in signal amplification due to analog compression, which is performed by logarithmic amplifiers whose negative feedback circuits contain components with non-linear volt-ampere characteristics (typically, diodes or bipolar transistors are used). It has been shown that the parameters of logarithmic signal compression can be controlled by modified circuits with auxiliary resistance dividers. The resistance dividers scale the logarithmic volt-ampere characteristics of emitter p-n junctions of bipolar n-p-n and p-n-p transistors. A substantial advantage of circuits with resistance dividers is that they provide the possibility to expand the range of the output voltage of logarithmic amplifiers and optimize the transition between the linear and logarithmic amplification regions. The work presents the results of simulation and experimental investigations into a logarithmic amplifier for a magnetic tracking system. Simulation was carried out using SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) models. We applied an integrated approach,*

which provides collections of transient characteristics of logarithmic amplifiers at different sets of the parameters of resistance dividers. The simulation results have been verified using our own software-firmware magnetic tracking tools – Magnetic Tracking System Integrated Development Environment. The signal converter was built upon a programmable system-on-chip PSoC 5LP by Cypress Semiconductor.

Keywords: magnetic tracking, actuator–sensor, measurement range, logarithmic amplifier, logarithmic compression, SPICE model

ЛОГАРИФМИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ СИГНАЛА ДЛЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ МАГНИТНОГО ТРЕКИНГА

Р. Л. Голяка, Т. А. Марусенкова, Д. В. Федасюк
 Национальный университет «Львовская политехника»

Аннотация. Работа посвящена проблематике сигнального преобразования в устройствах магнитного трекинга. Решается задача разработки и исследования сигнального преобразователя программно-аппаратных систем магнитного трекинга на основе логарифмического усилителя. Рассматриваются модифицированные схемы логарифмического усиления со вспомогательными резистивными делителями, преимущество которых является возможность расширения диапазона выходного напряжения логарифмических усилителей и оптимизация перехода между линейным и логарифмическим участками усиления. Представлены результаты модельных и экспериментальных исследований логарифмического усилителя системы магнитного трекинга.

Ключевые слова: магнитный трекинг, актюатор–сенсор, диапазон измерения, логарифмический преобразователь, логарифмическая компрессия, SPICE модель.

Received 03.02.2020



Голяка Роман Любомирович, Національний університет «Львівська політехніка», доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій. Вул. Ст. Бандери, 12, Львів, Україна. E-mail: holyaka@yahoo.com, тел. +380322582506

Roman Holyaka, Lviv Polytechnic National University, Dr. of Science, Professor, Professor at Department of Electronics and Information Technology, Bandery Str., 12, Lviv, Ukraine. E-mail: holyaka@yahoo.com, phone number +380322582506

ORCID ID: 0000-0002-7720-0372



Марусенкова Тетяна Анатоліївна, Національний університет «Львівська політехніка», кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення. Вул. Ст. Бандери, 12, Львів, Україна. E-mail: tetyana.marus@gmail.com, тел. +380322582578

Tetyana Marusenkova, Lviv Polytechnic National University, PhD, Associate Professor, Senior Lecturer at Software Department, Bandery Str., 12, Lviv, Ukraine. E-mail: tetyana.marus@gmail.com, phone number +380322582578

ORCID ID: 0000-0003-4508-5725



Федасюк Дмитро Васильович, Національний університет «Львівська політехніка», доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмного забезпечення. Вул. Ст. Бандери, 12, Львів, Україна. E-mail: fedasyuk@gmail.com, тел. +380322582578

Dmytro Fedasyuk, Lviv Polytechnic National University, Dr. of Science, Professor, Professor of Software Department, Bandery Str., 12, Lviv, Ukraine. E-mail: fedasyuk@gmail.com, phone number +380322582578

ORCID ID: 0000-0003-3552-7454