

---

doi: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.02.069>  
УДК 004.94

**Т.А. Марусенкова**, канд. техн. наук  
Національний університет «Львівська політехніка»  
(Україна, 79013, Львів, вул. Степана Бандери, 28а,  
e-mail: tetyana.marus@gmail.com)

## **SPICE модель логарифмуючого перетворювача систем магнітного трекінгу**

Досліджено проблему покращення експлуатаційних характеристик пристроїв магнітного трекінгу. Побудовано математичну модель одного з основних вузлів пристрою магнітного трекінгу — логарифмуючого аналогового тракту сигнального перетворювача, який забезпечує можливість ефективного функціонування пристроїв магнітного трекінгу в широкому діапазоні вимірювання просторового положення об'єктів. Розроблена SPICE модель дозволяє спростити підбір параметрів компонентної бази, а відтак, модель піддається ефективному налаштуванню відповідно до експериментальних даних. Параметрична оптимізація логарифмуючих перетворювачів з використанням розробленої моделі дозволяє проводити ефективний аналіз впливу дестабілізуючих факторів на функціональну залежність компресії сигналу.

*К л ю ч о в і с л о в а:* магнітний трекінг, логарифмічний перетворювач, SPICE модель, аналоговий тракт, сигнальний перетворювач.

На даний час серед основних напрямків розвитку інформаційно-комп'ютерних технологій надзвичайно актуальними стали концепції віртуальної (VR — Virtual Reality) та доповненої (AR — Augmented Reality) реальності [1]. Одночасно з подальшим розробленням математичних моделей та програмних засобів формування 3D (3-Dimensions) образів об'єктів віртуального світу [2] важливим є розроблення вбудованих систем (Embedded Systems) [3] сенсорів ближньої просторової навігації у фізичному світі [4]. Зокрема, такі сенсорні апаратно-програмні системи забезпечують вимірювання руху людини у просторі [5], локацію перешкод, розпізнавання жестів тощо [6].

Разом з оптичними пристроями розпізнавання оточуючого світу [7], мікроелектронними акселерометрами [8], та гіроскопами [9] ефективними сенсорами ближньої навігації вважаються пристрої магнітного тре-

© Марусенкова Т.А., 2020

кінгу (МТ — Magnetic Tracking) [10]. Метод магнітного трекінгу оснований 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 (ЕМТ — Electromagnetic Tracking) [11].

Досліджуючи проблему поліпшення експлуатаційних характеристик пристроїв магнітного трекінгу, побудуємо математичну модель одного з основних вузлів цих пристроїв — логарифмуючого аналогового тракту сигнального перетворювача, який забезпечує можливість ефективного функціонування пристроїв магнітного трекінгу в широкому діапазоні вимірювання просторового положення об'єктів. З розвитком концепції Інтернету речей (IoT — Internet of Things) вимоги до аналогових трактів суттєво підвищуються, зокрема критичними параметрами цих аналогових трактів стають мініатюрність, можливість стабільного функціонування при низьковольтних малопотужних джерелах живлення, здатність до програмного реконфігурування тощо [12]. Сформувався поняття сенсорного аналогового фронт-енду AFE (Sensor Analog Front-End) [13] та стало актуальним створення і використання математичних SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) [14] моделей аналогового фронт-енду пристроїв магнітного трекінгу. Вирішення цієї задачі забезпечує якість функціонування та ефективність процесу розроблення вбудованих систем згаданих вище VR, AR та IoT сенсорів просторової навігації.

**Постановка задачі.** Вимірювання просторового положення в сенсорних апаратно-програмних системах магнітного трекінгу проводять за 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, тобто відстань між котушками та їхній нахил одна відносно іншої.

Перевагами сенсорних пристроїв магнітного трекінгу порівняно з системами оптичного трекінгу є можливість їх функціонування поза зоною прямого бачення. Порівняно з системами інерційного трекінгу на основі інерційних вимірювальних модулів перевагами пристроїв магнітного трекінгу є можливість високоточного вимірювання просторового положення сенсорів відносно сформованої матрицею актюаторів системи

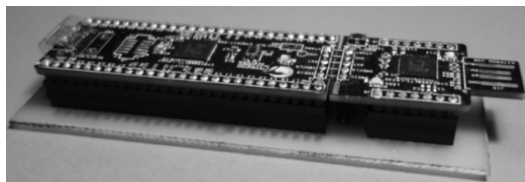
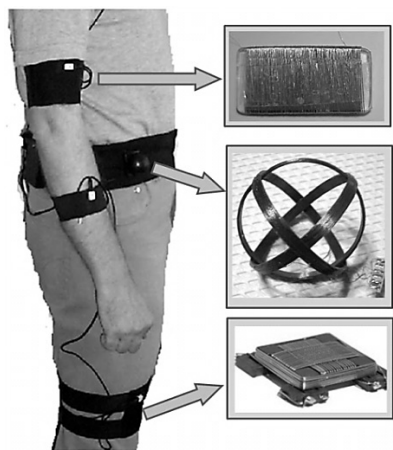


Рис. 2. Макетний взірець сигнального перетворювача системи магнітного трекінгу на основі програмованої системи PSoC 5LP

◀ Рис. 1. Котушки та їхнє розміщення в системі магнітного трекінгу руху людини

координат та відсутність похибок, обумовлених часовим дрейфом сигналів акселерометрів та гіроскопів [15].

Проведено модельні дослідження, що є частиною розроблення інтегрованого апаратно-програмного середовища — Magnetic Tracking System Integrated Development Environment (MTS IDE), яке призначено для підвищення ефективності процесу параметричної оптимізації вбудованих систем інтегрованих сенсорів електромагнітного трекінгу.

На рис. 1 зображено котушки актюаторів та сенсорів розробленої системи магнітного трекінгу руху людини в просторі в концепціях VR, AR та IoT. Актюаторні котушки розміщуються на поясі, а сенсорні — на руках, ногах та голові людини. В залежності від положення на тілі людини використовуються різноманітні котушки, зокрема Premo 3DV06 [16].

Важливі для уточнення параметрів та верифікації математичної моделі логарифмуючого підсилювача результати експериментальних досліджень отримували за допомогою макетного взірця апаратно-програмного середовища MTS IDE. Реалізацію вбудованої системи MTS IDE здійснено на основі програмованої системи на кристалі (PSoC — Programmable System-on-Chip) [17]. Використано серію PSoC 5LP з широким набором аналогових та цифрових компонентів, режими та алгоритми роботи яких специфіковані API (Application Programming Interface) функціями [18]. На рис. 2 показано зовнішній вигляд сигнального перетворювача, верхньою частиною якого є плата CY8CKIT-050 PSoC 5LP [19], а нижньою — макетна плата з компонентами, що не входять до складу PSoC 5LP (зокрема, діодно-резистивними ланками).

Основною проблемою реалізації сенсорних пристроїв магнітного трекінгу є необхідність вимірювання сигналів (напруг) сенсорних кату-

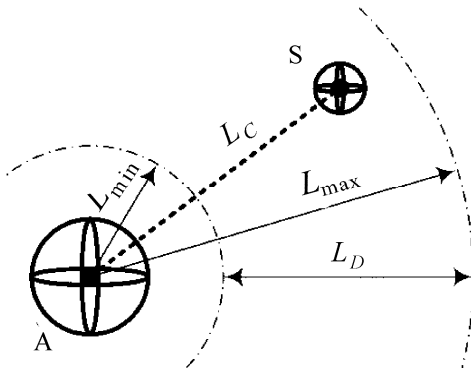


Рис. 3. Граничні відстані в сенсорних пристроях магнітного трекінгу

шок у широкому динамічному діапазоні, а саме від одиниць мікрівольта при відстанях декілька метрів у парах актюатор — сенсор до сотень мілівольт при зменшенні відстані до одиниць сантиметрів. Отже, важливою задачею, яка по-

требує вирішення при розробленні пристроїв магнітного трекінгу, є компресія сигналу. Ця задача вирішується за допомогою використання в аналоговому фронт-енді цих пристроїв логарифмуючого перетворювача.

**Аналіз проблеми.** У першому наближенні вихідна напруга  $V_{out}$  сенсорної котушки пристроїв магнітного трекінгу визначається оберненою кубичною функцією відстані  $L$  між сенсором і актюатором  $V_{out} \propto L^{-3}$  та тригонометричними функціями, що описують кути розміщення сенсора відносно актюатора [20]. Однією з найважливіших характеристик пристроїв магнітного трекінгу є допустимі значення мінімальної  $L_{min}$  та максимальної  $L_{max}$  відстані, в межах яких забезпечуються умови коректного вимірювання взаємного просторового положення в парах Actuator (A) — Sensor (S) (рис. 3). Значення  $L_{min}$  і  $L_{max}$  визначають допустиму просторову зону  $L_D$  вимірювання, здебільшого розміщену радіально відносно актюатора А. Результатами вимірювання є відстань  $L_c$  та кути повороту сенсора S як у власній рухомій системі координат, так і в стаціонарній системі координат актюатора А.

Мінімальна відстань  $L_{min}$  визначається спотворенням форми та обмеженням сигналу сенсора при рівнях, що перевищують максимально допустимі значення напруг  $V_{max}$  у сигнальних колах. Максимальна відстань  $L_{max}$  визначається співвідношенням сигнал-шум. При цьому співвідношення інформативних сигналів  $S$  [ $@L$ ], в даному випадку — напруг на сенсорних котушках на мінімальній  $L_{min}$  і максимальній  $L_{max} = L_{min} + L_D$  відстанях, — визначається степеневою залежністю (рис. 4):

$$K_S = \frac{S_{min}[@L_{max}]}{S_{max}[@L_{min}]} = \frac{S(L_{min} + L_D)}{S[L_{min}]} \propto \left( \frac{L_{min}}{L_{min} + L_D} \right)^3.$$

Зокрема при довжині просторової зони вимірювання  $L_D = 100$  см та мінімальної допустимій відстані  $L_{min} = 1$  см співвідношення  $K_S$  між сигналом

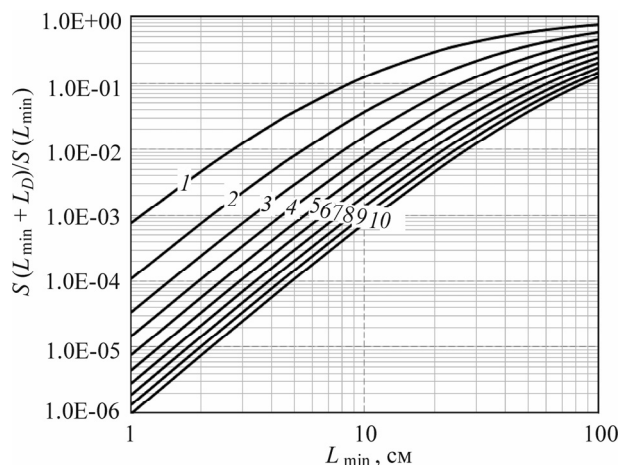


Рис. 4. Залежність зміни сигналу від  $L_{\min}$ : 1 —  $L_D=10$ ; 2 —  $L_D=20$ ; 3 —  $L_D=30$ ; 4 —  $L_D=40$ ; 5 —  $L_D=50$ ; 6 —  $L_D=60$ ; 7 —  $L_D=70$ ; 8 —  $L_D=80$ ; 9 —  $L_D=90$ ; 10 —  $L_D=100$

$S(L_{\min} + L_D)$  на відстані  $L_{\max} = L_{\min} + L_D$  та сигналом  $S(L_{\min})$  на відстані  $L_{\min}$  становить  $K_S = 1E-6$ , тобто 120 дБ. При збільшенні мінімальної допустимої відстані до  $L_{\min} = 5$  см це співвідношення змінюється на два порядки, тобто до  $K_S = 1E-4$  (80 дБ).

Проте необхідно враховувати також і кутову роздільну здатність вимірювання повороту сенсора. Кутові вимірювання, в залежності від точності вимірювання, теж потребують від двох до чотирьох порядків динамічного діапазону сигналу. Підсумовуючи компоненту зміни відстаней та компоненту зміни взаємних кутів в парі індуктивних котушок актюатор — сенсор, бачимо, що вимірювальний тракт сенсорів магнітного трекінгу повинен забезпечувати гранично широкий динамічний діапазон, а саме не менше шести порядків.

Проаналізуємо можливості сучасної сенсорної техніки щодо реалізації широкого динамічного діапазону вимірювального тракту в пристроях магнітного трекінгу. При цьому можна використовувати два основні методи сигнального перетворення.

Перший метод оснований на цифрових алгоритмах сигнального перетворення. Він передбачає використання аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) з гранично можливою роздільною здатністю та лінійністю функції перетворення. Реалізацію такого перетворення можна здійснити на високопрецизійних мікроконвертерах з АЦП на  $\Sigma\Delta$ -модуляторі та вхідними програмно-керованими колами аналогового фронт-енду. Це, зокрема, мікроконвертер ADuC834 (MicroConverter with Dual  $\Sigma\Delta$  ADCs and Embedded Flash MCU) 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

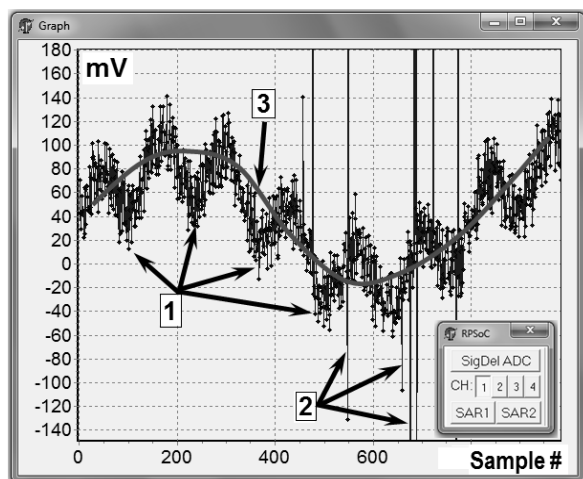


Рис. 5. Аналоговий сигнал сенсора магнітного трекінгу: Sample # — номер вимірювання; 1 — корисний сигнал з компонентами високочастотного спектру електромагнітної завади та власного шуму підсилювача; 2 — імпульсна електромагнітна завада ключових схем, блоків живлення чи інтерфейсів; 3 — отриманий усередненим сигналом рівень завади, що обумовлена електромагнітним випромінюванням силової мережі живлення 50 Гц

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 згаданій вище роздільній здатності.

Вирішення проблеми швидкодії можна забезпечити на основі високопродуктивних АЦП ADS1271 (Texas Instruments) чи AD7174 (Analog Devices). Однак в режимі швидкого перетворення шумові параметри таких АЦП також обмежують реальну роздільну здатність вимірювання до 20 біт. Крім того, для розуміння проблеми обмеження швидкодії сигнального перетворення в системах магнітного трекінгу на основі цифрових методів необхідно враховувати природу електромагнітних завад у сенсорних котушках. На рис. 5 наведено приклад експериментального дослідження сигналу сенсорної котушки на граничній відстані  $L_{\max}$  при коефіцієнті підсилення  $K_V = 1000$ . Результати отримано за допомогою швидкодіючих АЦП SAR (Successive Approximation Register) PSoC 5LP вбудованої системи MTS IDE.

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, утворена електромагнітним випромінюванням силової мережі живлення 50 Гц, обумовлює необхідність інтегрування сигналу протягом від 20 мс (гірший варіант вимірювання при інтегруванні за один період завади) до 200 мс (оптимальна тривалість відносно максимальної ефективності вимірювання). Отже, створення багатоканальних сигнальних перетворювачів систем магнітного трекінгу при вказаній оптимальній тривалості інтегрування є неможливим. В за-

лежності від призначення системи кількість каналів аналогового фронтенду становить від трьох (при одній точці трекінгу на одній сенсорній 3D котушці) до 30 при десяти 3D котушках, зокрема, в системі трекінгу руху людини (по дві на кожній руці та нозі, на голові тощо).

Другий метод оснований на комбінованих алгоритмах з попередньою аналоговою компресією сигналу. Такі алгоритми передбачають декілька послідовних стадій перетворення. На першій стадії проводиться підсилення сигналу з його аналоговим логарифмуванням, а на другій стадії — аналого-цифрове перетворення. На подальших стадіях перетворення використовують відповідні математичні моделі 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 [22].

Відповідно до зазначеного методу з попередньою аналоговою компресією сигналу розглянемо математичну SPICE модель логарифмуючого перетворювача для систем магнітного трекінгу. Використання такої моделі дозволяє:

- оптимізувати режими компресії;
- встановити дестабілізуючі фактори відхилення реальної функції перетворення від її номінального (теоретичного) представлення;
- отримати масиви числових даних, на основі яких відбувається подальша цифрова декомпресія сигналу.

Важливим є не лише принцип логарифмуючої компресії, але і специфіка його реалізації в системах магнітного трекінгу.

По-перше, необхідно оптимізувати діапазон логарифмування. Так, логарифмувати напруги в діапазоні нижче певного порогового рівня  $V_{TH}$  (зокрема, при  $V_{TH} < 10$  мВ, де  $TH$  — поріг (Threshold)) недоцільно з точки зору втрати чутливості вимірювання при значній відстані між сенсором та актюатором. Враховуючи це, в діапазоні малих напруг необхідно проводити лінійне підсилення сигналів з мінімальним впливом інших вузлів сигнального перетворення, 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.

Отже, вирішувана задача детального параметричного аналізу схем логарифмуючих перетворювачів є надзвичайно актуальною.

**Математична SPICE модель логарифмуючого перетворювача.**

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 експоненційною залежністю струму від прикладеної до  $p$ - $n$ -переходу напруги у прямому зміщенні [22]:

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

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

Коефіцієнт неідеальності  $N$  визначається рядом факторів, основним з яких є коефіцієнт емісії (Emission coefficient). У переважній більшості кремнієвих діодів та транзисторів в діодному включенні коефіцієнт неідеальності лежить в межах  $N = 1,0 \dots 2,5$ . Температурний потенціал є лінійною функцією абсолютної температури  $T$  і при кімнатній температурі ( $T \approx 300$  К) становить  $\varphi_T \approx 26$  мВ. Крім того, на вольт-амперну характеристику  $p$ - $n$ -переходу впливають паразитні резистивні складові діода.

Функцію логарифмування отримують з використанням лінійного перетворення вхідної напруги підсилювача в струм, а далі цей струм пропускають через діод. Напруга на діоді, яка логарифмічно залежить від його струму, слугує вихідною напругою підсилювача з логарифмічною функціональною залежністю від вхідної напруги. За умови достатньо значного прямого зміщення (напруги на  $p$ - $n$ -переході понад 200 мВ), що спостерігається в практичних схемах логарифмуючих підсилювачів на кремнієвих діодах, та за припущення, що  $V_{pn}/N\varphi_T \gg 1$ , вольт-амперну характеристику може бути подано у вигляді наближення  $I_{pn} \approx I_S e^{V_{pn}/N\varphi_T}$ . Логарифмуючи останній вираз, отримуємо

$$V_{pn} \approx N\varphi_T \ln \frac{I_{pn}}{I_S} = N\varphi_T (\ln(I_{pn}) - \ln(I_S)).$$

Відтак, у першому наближенні напруга  $V_{pn}$  на прямо-зміщеному  $p$ - $n$ -переході є функцією логарифму струму  $I_{pn}$ .



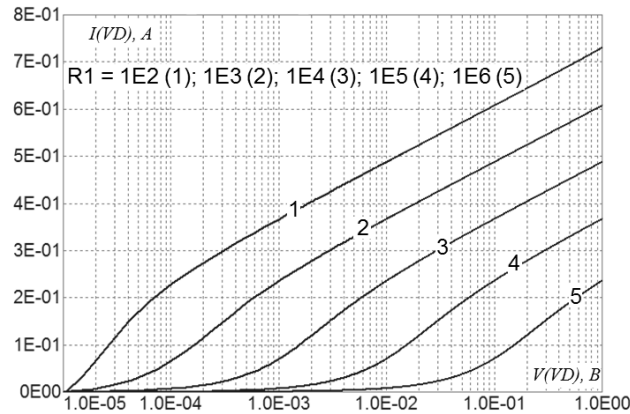


Рис. 6. Передавальна характеристика діодно-резистивної ланки

Використання діодів в задачах аналогового логарифмування сигналу передбачає модельні та експериментальні дослідження вольт-амперних характеристик цих діодів, які необхідні для аналізу реальних параметрів функції логарифмування. Визначальними параметрами, що впливають на функцію логарифмування, є коефіцієнт  $N$  та паразитні резистивні складові діода, а саме послідовний  $R_S$  та паралельний  $R_L$  опори.

Для модельних досліджень було використано SPICE моделі діодів програмного забезпечення Micro-Cap [23], які за складністю характеризують рівнем Level. Зокрема, в моделях другого рівня (Level = 2) використовують такі параметри:  $I_S$  (Saturation current) — струм насичення;  $I_{SR}$  (Recombination current) — струм рекомбінації;  $N$  (Emission coefficient) — коефіцієнт емісії (у відповідності до позначень [23] — коефіцієнт неідеальності);  $R_S$  (Series resistance) та  $R_L$  (Junction leakage resistance) — послідовна та паралельна складові паразитного опору;  $EG$  (Energy gap, eV) — ширина забороненої зони в електрон-вольтах;  $XTI$  (Temperature exponent for  $I_S$ ) — температурний коефіцієнт струму насичення;  $T\_MEASURED$  (Measured temperature, Celsius) — температура в градусах Цельсія тощо.

Для реалізації схем двополярного логарифмування використовують ланку на парі паралельно ввімкнених діодів з протилежною полярністю. Паралельно до такої пари вмикають високоомний резистор, опір якого стабілізує початкові струми схеми логарифмування. Така стабілізація необхідна відносно впливу паралельної складової  $R_L$  згаданого вище паразитного опору діодів.

Результат проведеного модельного дослідження вольт-амперної характеристики схеми двополярного логарифмування з використанням

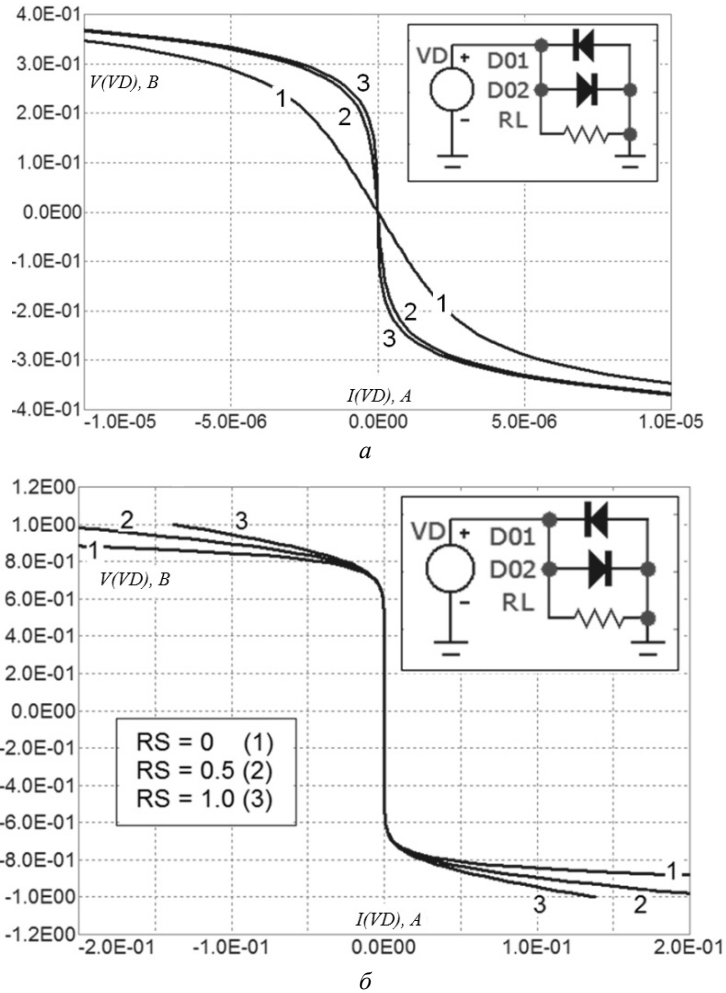


Рис. 7. Сімейство початкових ділянок (а) та сімейство передавальних характеристик (б) діодно-резистивної ланки: а—1—  $RL = 1E5$  Ом; 2—  $RL = 1E6$  Ом; 3—  $RL = 1E9$  Ом; б— 1—  $RS = 0$  Ом; 2—  $RS = 0,5$  Ом; 3—  $RS = 1$  Ом

SPICE моделей показано на рис. 6. Режим роботи схеми задається джерелом VD. Отримана характеристика в цілому добре відтворює бажану логарифмічну залежність напруги від струму. Факт того, що отримана залежність є інверсною, тобто додатні значення напруги  $V(VD)$  формуються при від'ємних значеннях струму  $I(VD)$ , обумовлений специфікою SPICE моделей джерела VD (струм  $I(VD)$  джерела VD є протилежним до струму в зовнішньому електричному колі). Крім того, така інверсія є характерною для практичних схем логарифмуючих перетворювачів на основі інвертуючих підсилювачів.

На практиці діапазон логарифмування сигналу з використанням вольт-амперної характеристики  $p$ - $n$ -переходу обмежується впливом послідовної  $RS$  та паралельної  $RL$  складових опору діода. Послідовна складова опору обмежує діапазон логарифмування при значних струмах (більше десяти міліампер), а паралельна – при гранично малих струмах (менше часток мікроампера). Це відображено на прикладах модельних досліджень. Зокрема, на рис. 7, а, наведено початкову ділянку передавальної характеристики двополярного логарифмуючого кола для трьох значень паралельної складової опору діода. Можна бачити, що зменшення опору  $RL$  призводить до відповідного зменшення порогового рівня напруги  $V_{TH}$ , при якому відбувається перехід між ділянкою квазілінійного підсилення ( $V < V_{TH}$ ) та ділянкою логарифмування ( $V > V_{TH}$ ). Вплив послідовної складової опору діода показано на рис. 7, б. Наведений результат модельних досліджень відповідає трьом значенням цього опору.

Подальший етап модельного дослідження передбачає синтез SPICE схеми заміщення логарифмуючого перетворювача з урахуванням параметрів його активних компонентів. Здебільшого такими компонентами є операційні підсилювачі, які у таких схемах забезпечують перетворення вхідної напруги  $V_{in}$  у струм логарифмуючого діодно-резистивного кола.

Розрізняють декілька рівнів SPICE моделей операційних підсилювачів: Level 1 – елементарне представлення функції підсилення; Level 2 – відображає теоретичні уявлення про більшість параметрів операційного підсилювача; Level 3 – відображає можливі відхилення параметрів від номінальних значень. Основними параметрами операційних підсилювачів, що мають суттєвий вплив на результуючі характеристики логарифмуючих перетворювачів, є наступні: TYPE – тип транзисторів вхідного кола (1=NPN, 2=PNP, 3=JFET); IBIAS – струм вхідних кіл (Input bias current); VOFF – вхідна напруга зміщення (Input offset voltage); IOFF – вхідний струм зміщення (Input offset current); SRP – максимальна швидкість наростання вихідної напруги (Maximum positive slew rate); VCC – додатна напруга живлення (Positive power supply); VEE – від'ємна напруга живлення (Negative power supply); VPS – максимальний розмах додатної вихідної напруги (Maximum positive voltage swing); VNS – максимальний розмах від'ємної вихідної напруги (Maximum negative voltage swing); GBW – смуга частот при одиничному коефіцієнті підсилення (Unity gain bandwidth); SRN – максимальна швидкість спадання вихідної напруги (Maximum negative slew rate).

У відповідності до цих параметрів операційних підсилювачів було синтезовано схему заміщення SPICE моделі логарифмуючого перетворювача, зображену на рис. 8. Значення параметрів моделі відповідають

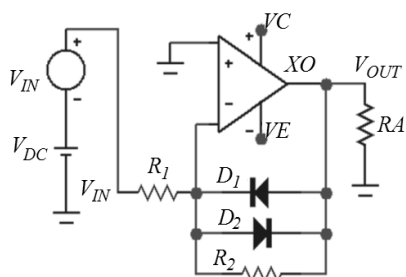


Рис. 8. Схема заміщення SPICE моделі логарифмуючого перетворювача на операційних підсилювачах Opamp програмованої системи на кристалі PSoC 5LP:  $V_{in}$ ,  $V_{DC}$  — джерела;  $XO$  — формування вхідного сигналу; операційний підсилювач;  $V_C$ ,  $V_E$  — джерела кола живлення;  $R_1$  — резистор перетворення вхідної напруги  $V_{in}$  у струм;  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $R_2$  — логарифмуюча діодно-резистивна ланка;  $R_A$

специфікації операційних підсилювачів Opamp програмованої системи на кристалі PSoC 5LP (Opamp — Operational Amplifier, Component Datasheet, Cypress Semiconductor Corporation) [24].

Приклади результатів модельного дослідження передавальних характеристик логарифмуючих перетворювачів на згаданих операційних підсилювачах наведено на рис. 9 для визначених наборів значень. Подані сімейства характеристик виявляють закономірності впливу резисторів схеми перетворювача на переходи між ділянками квазілінійного підсилення та логарифмування, а також вплив на ці ділянки реальних параметрів операційних підсилювачів.

Отримані результати мають важливе значення для оптимізації режимів компресії та встановлення дестабілізуючих факторів відхилення реальної функції перетворення від її теоретичного відтворення. Використовуючи отримані сімейства передавальних характеристик, формують масиви числових даних, на основі яких відбувається подальша цифрова декомпресія сигналу, яка здійснюється цифровими блоками програмованої системи на кристалі PSoC 5LP.

Ще один приклад результатів модельних досліджень, який наочно демонструє процес логарифмування сигналу, наведено на рис. 10. Коефіцієнт масштабування вхідної напруги  $K_m = 100$  введено з метою демонстрації вхідної та вихідної напруг в одному масштабі.

**Апробація моделі.** Реалізацію схеми логарифмуючого перетворювача та апробацію його SPICE моделі здійснено на основі програмованої системи PSoC 5LP (див. рис. 2). Програмне конфігурування компонент перетворювача та реалізацію алгоритму його функціонування здійснено в IDE PSoC Creator (рис. 11).

Крім логарифмічного підсилювача (Opamp\_1, D\_1, D\_2, R\_1, R\_2), схема містить джерело опорної напруги  $V_{ref}$ , програмно-керований підсилювач на компоненті PGA\_1 (Programmable Gain Amplifier), високопродуктивний АЦП ADC\_SAR\_1 (Analog – Digital Converter on Successive Approximation Register) та UART\_1 (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) інтерфейс. Компонента PGA\_1 використовується для завершального нормування сигналу.

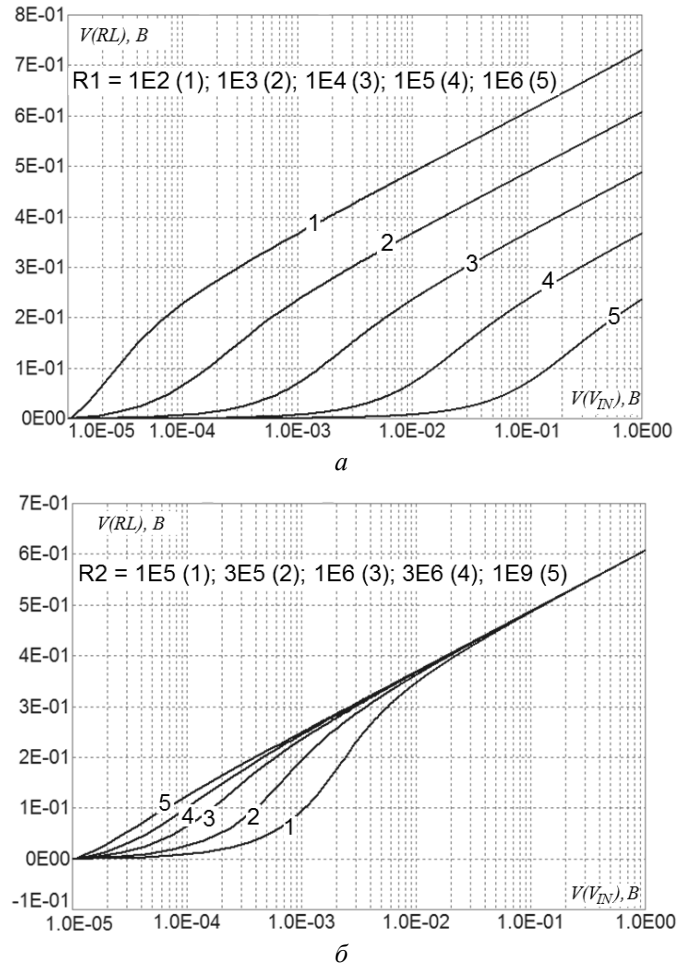


Рис. 9. Сімейство передавальних характеристик логарифмуючого перетворювача

Таке нормування здійснюється додатковим підсиленням напруги логарифмуючого підсилювача з діапазону логарифмування  $\pm 0,6$  В до оптимального діапазону  $\pm 2,4$  В щодо подальшого аналого-цифрового перетворення на основі ADC\_SAR\_1. Відлік у вказаних діапазонах напруг здійснюється відносно опорного значення напруги  $V_{ref} = V_{dd}/2$ , де  $V_{dd}$  – напруга однополярного живлення схеми. Компонента UART\_1 призначена для зв'язку PSoC 5LP з комп'ютером, програмне забезпечення якого відповідає алгоритму вимірювання та дозволяє подальше опрацювання вихідних даних.

З використанням наведеного макетного взірця сигнального перетворювача були проведені експерименти з дослідження ефективності логарифмування.

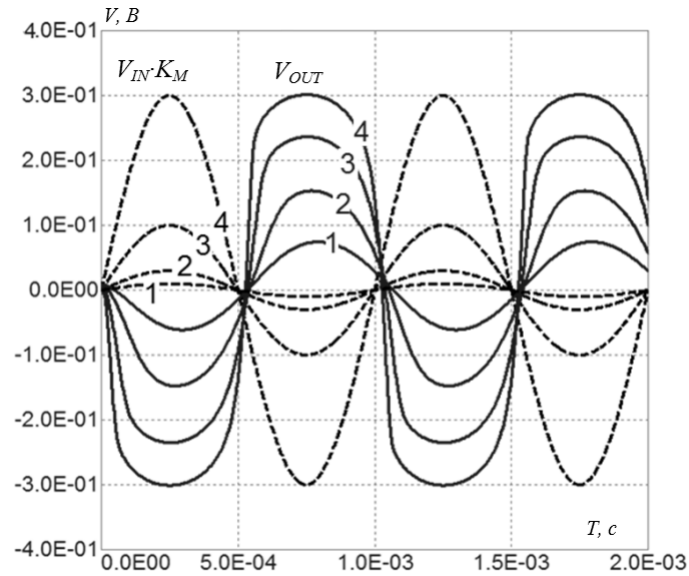


Рис. 10. Сімейство епюр вхідних  $V_{in} K_M$  та вихідних  $V_{out}$  напруг: 1 —  $V_{in} = 1E-4$  В; 2 —  $3E-4$  В; 3 —  $1E-3$  В; 4 —  $3E-3$  В;  $K_M = 100$

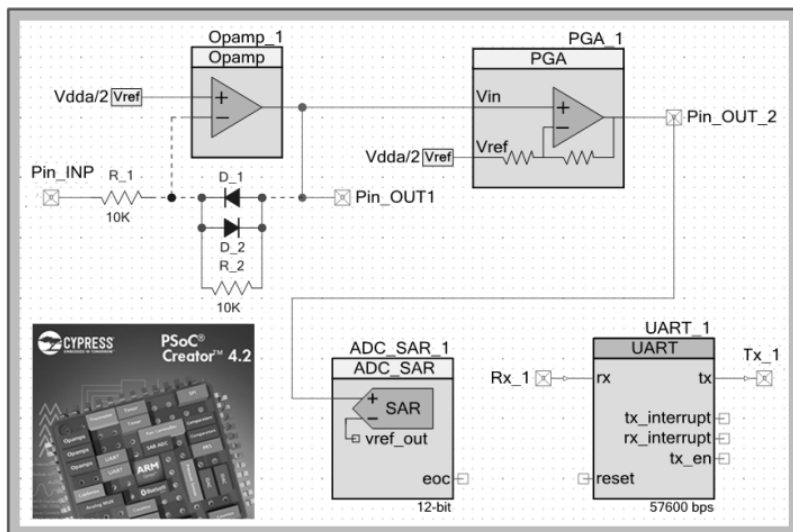


Рис. 11. Компоненти реалізації схеми логарифмуючого перетворювача на основі PSoC 5LP

рифмуючого перетворення. На рис. 12 наведено результати дослідження форми синусоїдального сигналу системи магнітного трекінгу без логарифмічного перетворення, які свідчать про наявність обмеження амплітуди, що призводить до втрати інформативності процесу вимірювання.

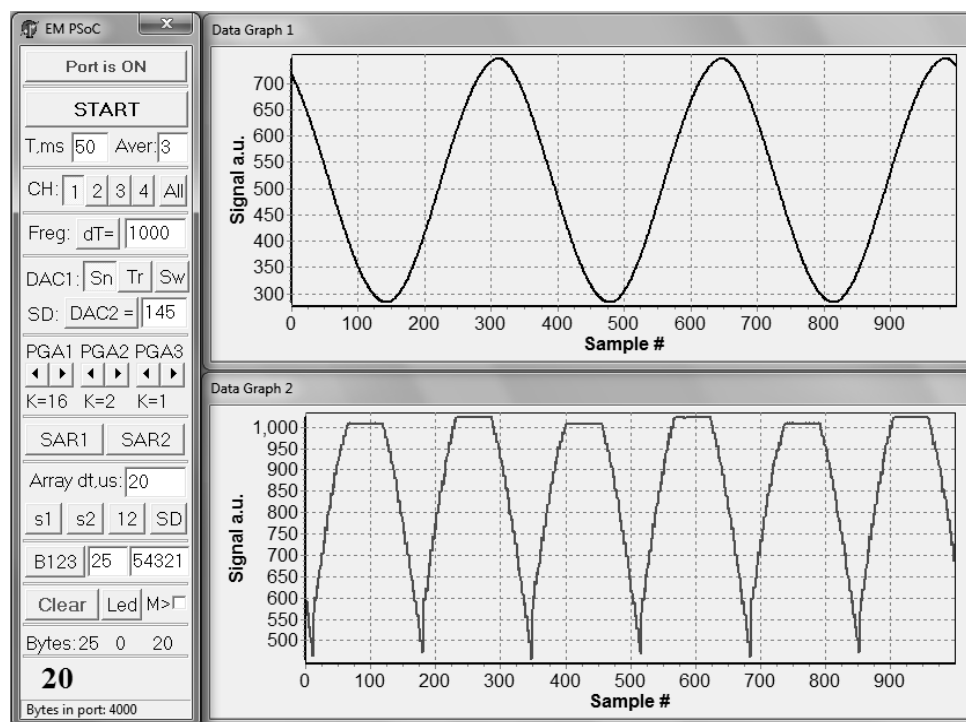


Рис. 12. Епюри задаючого (зверху) та інформативного (знизу) сигналів системи магнітного трекінгу без логарифмуючого перетворення

Результати дослідження передавальної характеристики логарифмуючого перетворювача показано на рис. 13. Вимірювання проводилося при  $K_V = 4$  програмно-керованого підсилювача PGA\_1 (див. рис. 11).

Результат вимірювання вихідних напруг сигнального перетворювача магнітного трекінгу без логарифмування та з логарифмуванням при гармонічному вхідному сигналі амплітудою 50 мВ подано на рис. 14. Як бачимо, використання логарифмічної компресії дозволяє запобігти обмеженню сигналу, а відтак, забезпечує необхідну чутливість вимірювання.

Подальша стадія сигнального перетворення передбачає цифрову декомпресію сигналу з компенсацією параметричної та температурної нестабільності аналогового тракту.

Результати модельного дослідження логарифмуючого перетворювача використовуються для оптимізації режимів компресії та встановлення впливу дестабілізуючих факторів на функцію перетворення. Такими факторами є розкид параметрів компонентної бази, температура та напруга живлення. Використовуючи отримані за допомогою модельних досліджень сімейства передавальних характеристик, формують масиви числових даних для проведення подальшої цифрової декомпресії сигналу з урахуванням де-

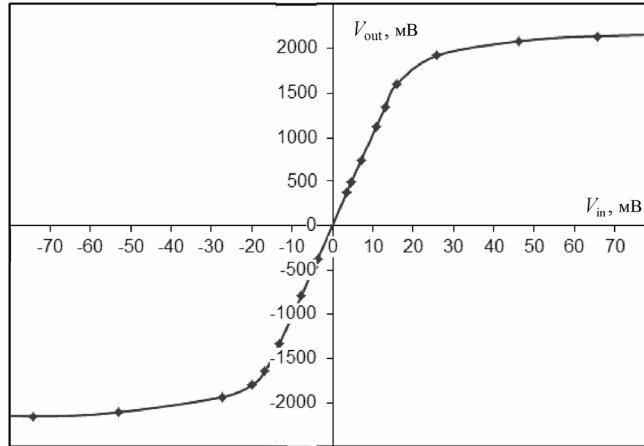


Рис. 13. Результати експериментального дослідження передавальної характеристики логарифмуючого перетворювача

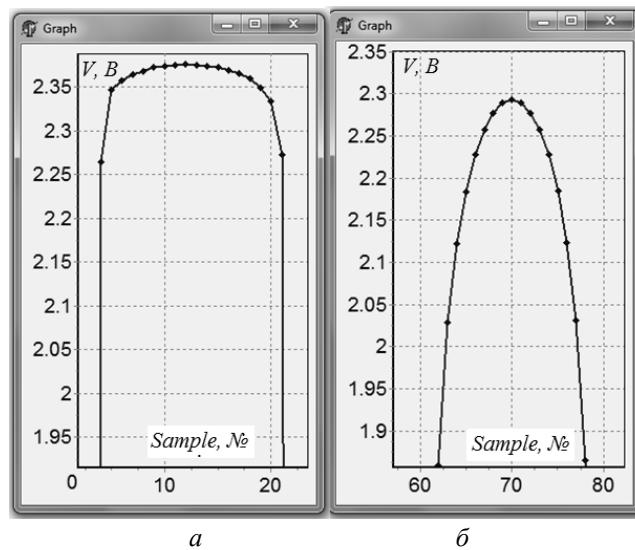


Рис. 14. Епюри вихідних напруг без (зліва) та з (справа) логарифмічною компресією

стабілізуючих факторів. Розроблена SPICE модель характеризується простою підбором параметрів компонентної бази, а відтак, піддається ефективному налаштуванню відносно експериментальних даних.

Важливим є вибір діапазону логарифмування. Розглянутий логарифмічний перетворювач забезпечує можливість керування таким діапазоном. При низьких рівнях сигналу (при трекінгу на великих відстанях) спостерігається лінійне підсилення, що забезпечує високу точність сиг-



нального перетворення. При високих рівнях сигналу (при трекінгу на коротких відстанях) перетворювач переходить в режим логарифмування, що запобігає обмеженню сигналу та, при використанні відповідних алгоритмів цифрової декомпресії з компенсацією нестабільності функції логарифмування, забезпечує можливість трекінгу на коротких відстанях.

## Висновки

Отримані результати дозволяють покращити експлуатаційні характеристики пристроїв магнітного трекінгу і мають важливе значення для оптимізації режимів компресії та встановлення дестабілізуючих факторів відхилення реальної функції перетворення від її теоретичного відтворення. Використовуючи отримані сімейства передавальних характеристик, формують масиви числових даних, на основі яких відбувається подальша цифрова декомпресія сигналу. Результати впровадження представленої моделі в сигнальних перетворювачах систем магнітного трекінгу будуть використані у подальшій роботі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kim K., Billinghurst M., Bruder G., Duh H., Welch G. Revisiting trends in augmented reality research: a review of the 2nd decade of ISMAR (2008–2017) // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2018, 24(11), pp. 2947–2962. DOI: 10.1109/TVCG.2018.2868591.
2. Chatzopoulos D., Bermejo C., Huang Z., Hui P. Mobile augmented reality survey: from where we are to where we go // IEEE Access, 2017, 5, pp. 6917–6950. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2698164.
3. Mancini A., Frontoni E., Zingaretti P. Embedded multisensor system for safe point-to-point navigation of impaired users // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(6), pp. 3543–3555. DOI: 10.1109/TITS.2015.2489261.
4. Rohmer K., Jendersie J., Grosch T. Natural environment illumination: coherent interactive augmented reality for mobile and non-mobile devices // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2017, 23(11), pp. 2474–2484. DOI: 10.1109/TVCG.2017.2734426.
5. Campbell A., Gorgu L., Kroon B. et al. Giving mobile devices a SIXTH sense: Introducing the SIXTH middleware for Augmented Reality applications // Proceedings of the 2013 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2013. DOI: 10.1109/ISMAR.2013.6671787.
6. Hoff W., Vincent T. Analysis of head pose accuracy in augmented reality // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2000, 6(4), pp. 319–334. DOI: 10.1109/2945.895877.
7. Oskiper T., Sizintsev M., Branzoi V. et al. Augmented reality binoculars // Ibid, 2015, 21(5), pp. 611–623. DOI: 10.1109/TVCG.2015.2408612.
8. Fedasyuk D., Holyaka R., Marusenkova T. A tester of the MEMS accelerometers operation modes // Proc. of the 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT). Lviv, July 3–6, 2019, IEEE Publisher, 2019. DOI: 10.1109/AICT.2019.8847840.

9. Fedasyuk D., Holyaka R., Marusenkova T. Method of analyzing dynamic characteristics of MEMS gyroscopes in test measurement mode // Proc. of the 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). Ceske Budejovice, June 5–7, 2019, IEEE Publisher, 2019, pp. 157–160. DOI: 10.1109/ACITT.2019.8780058.
10. Hongtao W., Zhimin Y., Ping W., Santoso B., Lian O. A novel method of motion tracking for virtual reality using magnetic sensors // Proc. of the 2018 Asia-Pacific Magnetic Recording Conference (APMRC). Shanghai, November 15–17, 2018. DOI: 10.1109/APMRC.2018.8601108.
11. Singh M., Jung B. High-definition wireless personal area tracking using AC magnetic field for virtual reality // 2017 IEEE Virtual Reality, 2017. DOI: 10.1109/VR.2017.7892250.
12. Tran-Dang H., Kim D. An information framework for Internet of Things services in physical Internet // IEEE Access, 2018, 6, pp. 43967–43977. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2864310.
13. Jo S., Cho H., Yoo H. A fully reconfigurable universal sensor analog front-end IC for the Internet of Things era // IEEE Sensors Journal, 2019, 19(7), pp. 2621–2633. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2890211.
14. Amer S., Hasan M., Adnan M., Rose G. SPICE modeling of insulator metal transition: model of the critical temperature // IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2019, 7, pp. 18–25. DOI: 10.1109/JEDS.2018.2875627.
15. Marusenkova T.A. Simulation models for synthesizing noise of MEMS gyroscopes // Elektronnoje Modelirovaniye, 2019, 41(5), pp. 3–17.
16. Premo 3DV06 Datasheet. Режим доступа: <https://3dcoil.grupopremo.com>.
17. PSoC® 5LP: CY8C52LP Family Datasheet: Programmable System-on-Chip. Режим доступа: <http://www.cypress.com/documentation/datasheets/psoc-5lp-cy8c52lp-family-datasheet-programmable-system-chip-psoc>.
18. Barylo G., Boyko O., Holyaka R. et al. Signal transducer of functionally integrated thermomagnetic sensors // Visnyk NTUU KPI. Seriya Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia, 2019, 76, pp. 63–71.
19. CY8CKIT-050 PSoC 5LP Development Kit Guide. Режим доступа: <http://www.cypress.com/file/45276/download>.
20. Ripka P., Zikmund A. Magnetic tracker with high precision // Procedia Engineering, 2011, 25, pp. 1617–1620.
21. ADuC834. MicroConverter, Dual ADCs with Embedded Flash MCU. Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADUC834.pdf>.
22. Jaeger R., Blalock T. Microelectronic Circuit Design// McGraw-Hill Education, 2016, 1355 p.
23. MICRO-CAP. Electronic Circuit Analysis Program. Spectrum Software. Режим доступа: <http://www.spectrum-soft.com>.
24. Operational Amplifier (Opamp) – ver. 1.90. PSoC® Creator™ Component Datasheet. Cypress Semiconductor Corporation. Режим доступа: <https://www.cypress.com/file/131331/download>.

Отримано 22.01.20  
після доопрацювання 20.02.20

REFERENCES

1. Kim, K., Billingham, M., Bruder, G., Duh, H. and Welch, G. (2018), "Revisiting trends in augmented reality research: a review of the 2nd decade of ISMAR (2008–2017)", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 24, Issue. 11, pp. 2947–2962. DOI: 10.1109/TVCG.2018.2868591.
2. Chatzopoulos, D., Bermejo, C., Huang, Z. and Hui, P. (2017), "Mobile augmented reality survey: from where we are to where we go", *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 6917–6950. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2698164.
3. Mancini, A., Frontoni, E. and Zingaretti, P. (2015), "Embedded multisensor system for safe point-to-point navigation of impaired users", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 16, Issue. 6, pp. 3543–3555. DOI: 10.1109/TITS.2015.2489261.
4. Rohmer, K., Jendersie, J. and Grosch, T. (2017), "Natural environment illumination: coherent interactive augmented reality for mobile and non-mobile devices", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 23, Issue. 11, pp. 2474–2484. DOI: 10.1109/TVCG.2017.2734426.
5. Campbell, A., Gorgu, L., Kroon, B., Lillis, D., Carr, D. and O'Hare, G. (2013), "Giving mobile devices a SIXTH sense: Introducing the SIXTH middleware for Augmented Reality applications", *Proceedings of the 2013 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. DOI: 10.1109/ISMAR.2013.6671787.
6. Hoff, W., and Vincent, T. (2000), "Analysis of head pose accuracy in augmented reality", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 6, Issue. 4, pp. 319–334. DOI: 10.1109/2945.895877.
7. Oskiper, T., Sizintsev, M., Branzoi, V., Samarasekera, S. and Kumar, R. (2015), "Augmented reality binoculars", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 21 Issue. 5, pp. 611–623. DOI: 10.1109/TVCG.2015.2408612.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Tran-Dang, H. and Kim, D. (2018), "An information framework for Internet of Things services in physical Internet", *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 43967–43977. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2864310.
13. Jo, S., Cho, H. and Yoo, H. (2019), "A fully reconfigurable universal sensor analog front-end IC for the Internet of Things era", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 19, Issue. 7, pp. 2621–2633. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2890211.
14. Amer, S., Hasan, M., Adnan, M. and Rose, G. (2019), "SPICE modeling of insulator metal transition: model of the critical temperature", *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, Vol. 7, pp. 18–25. DOI: 10.1109/JEDS.2018.2875627.

15. Marusenkova, T.A. (2019), "Simulation models for synthesizing noise of MEMS gyroscopes", *Elektronnoje Modelirovanije*, Vol. 41, no. 5, pp. 3-17.
16. (2018), "Premo 3DV06 Datasheet", available at: <https://3dcoil.grupopremo.com> (accessed December 10 2019).
17. Cypress Semiconductor Corporation. (2019), "PSoC® 5LP: CY8C52LP Family Datasheet: Programmable System-on-Chip", available at: <http://www.cypress.com/documentation/datasheets/psoc-5lp-cy8c52lp-family-datasheet-programmable-system-chip-psoc> (accessed December 12 2019).
18. Barylo, G., Boyko, O., Holyaka, R., Marusenkova, T., Prudyus, I. and Fabirovskyy, S. (2019), "Signal transducer of functionally integrated thermomagnetic sensors", *Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, Issue. 76, pp. 63-71.
19. Cypress Semiconductor Corporation. (2018), "CY8CKIT-050 PSoC 5LP Development Kit Guide", available at: <http://www.cypress.com/file/45276/download> (accessed December 10 2019).
20. Ripka, P. and Zikmund, A. (2011), "Magnetic tracker with high precision", *Procedia Engineering*, Vol. 25, pp. 1617-1620.
21. (2016), "ADuC834. MicroConverter, Dual ADCs with Embedded Flash MCU", available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADUC834.pdf> (accessed December 16 2019).
22. Jaeger, R. and Blalock, T. (2016), *Microelectronic Circuit Design 5th ed*, McGraw-Hill Education.
23. (2014), "MICRO-CAP. Electronic Circuit Analysis Program. Spectrum Software", available at: <http://www.spectrum-soft.com> (accessed April 13 2019).
24. Cypress Semiconductor Corporation. (2017), "Operational Amplifier (Opamp) – ver. 1.90. PSoC® Creator™ Component Datasheet".

Received 22.01.20  
after revision 20.02.20

Т.А. Марусенкова

#### SPICE МОДЕЛЬ ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СИСТЕМ МАГНИТНОГО ТРЕКИНГА

Исследована проблема улучшения эксплуатационных характеристик устройств магнитного трекинга. Построена математическая модель одного из основных узлов устройства магнитного трекинга – логарифмического аналогового тракта сигнального преобразователя, который обеспечивает возможность эффективного функционирования устройств магнитного трекинга в широком диапазоне измерения пространственного положения объектов. Разработанная SPICE модель позволяет упростить подбор параметров компонентной базы, следовательно, поддается эффективной настройке в соответствии с экспериментальными данными. Параметрическая оптимизация логарифмических преобразователей с использованием разработанной модели позволяет проводить эффективный анализ влияния дестабилизирующих факторов на функциональную зависимость компрессии сигнала.

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* магнитный трекинг, логарифмический преобразователь, SPICE модель, аналоговый тракт, сигнальный преобразователь.

*T.A. Marusenkova*

SPICE MODEL OF A LOGARITHMIC CONVERTER  
FOR MAGNETIC TRACKING SYSTEMS

The work deals with the problem of enhancing the operating characteristics of magnetic tracking devices. Magnetic tracking technology is based on calculating the spatial position of an object upon measuring reference magnetic fields in a low-frequency radiation spectrum. The paper presents a solution to development of a mathematical model for a logarithmic signal converter, which is one of the main components of a magnetic tracking device. The converter would enable efficient operation of a magnetic tracking device in a wide measurement range. The parameters of the developed SPICE model are easy to tune. Thus, the model can be efficiently adjusted to conform to experimental data. The parametric optimization of logarithmic converters upon the proposed model gives rise to an efficient analysis of the influence of destabilizing factors on signal compression.

*Key words:* magnetic tracking, logarithmic converter, SPICE model, analog front-end, signal transducer.

*МАРУСЕНКОВА Тетяна Анатоліївна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення Національного університету «Львівська політехніка», який закінчила у 2005 р. Область наукових досліджень — математичне моделювання, інерційні сенсори, вбудоване програмне забезпечення.*