



ЕЛЕКТРОНІКА ТА ІНЖЕНЕРІЯ

МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ФОТОДІОДНИХ СЕНСОРНИХ ПРИСТРОЇВ

Г.І. Барило^[ORCID: 0000-0001-5749-9242], Р.Л. Голяка^[ORCID: 0000-0002-7720-0372], П.В. Брич^[ORCID: 0009-0003-8213-8897],
М.В. Павленко^[ORCID: 0009-0002-8697-7236], Т.А. Онутчак^[ORCID: 0009-0009-4739-1583]

Національний університет «Львівська політехніка» вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Відповідальний за рукопис: Григорій Барило (e-mail: hryhorii.i.barylo@lpnu.ua).

(Подано 27 січня 2025)

У статті висвітлено підходи до реалізації сигнального перетворювача фотодіодних сенсорних пристроїв у межах концепції програмованих систем на кристалі (ПСнК), що є важливим напрямом розвитку сучасних сенсорних технологій. Детально проаналізовано можливості SPICE-моделювання для дослідження параметрів фотодіодів і компонентів аналогового фронт-енду, що дозволяє досягти високої точності аналізу та оптимізації сигнальних перетворювачів. Відмінною особливістю запропонованих моделей є врахування впливу паразитних параметрів фотодіодів, таких як паразитна ємність і опір, які є суттєвими джерелами спотворень під час перетворення сигналів. У роботі також досліджено вплив температурної нестабільності, яка негативно позначається на працездатності сенсорних пристроїв та обмежує їх ефективність у реальних умовах експлуатації. Розроблені моделі забезпечують глибоке розуміння механізмів впливу цих факторів на стабільність і точність роботи сигнальних ланцюгів. У статті запропоновано методики параметричного аналізу сигнальних перетворювачів, що дозволяють не лише оцінити вплив змін параметрів компонентної бази, але й встановити основні закономірності виникнення похибок на різних етапах сигнального перетворення. Проведено серію SPICE-симуляцій, які демонструють залежність частотних характеристик, часової стабільності та енергоефективності від змін параметрів елементів. Особливу увагу приділено аналізу конструктивних особливостей фотодіодів та характеристик операційних підсилювачів, які є невід'ємною частиною сигнального тракту. Отримані результати підтверджують, що використання розроблених моделей у поєднанні з SPICE-моделюванням відкриває можливості для оптимізації параметрів сигнальних перетворювачів. Це дозволяє досягти мінімізації впливу паразитних факторів і забезпечити стабільну роботу сенсорних пристроїв навіть у складних умовах експлуатації, таких як коливання температури або вплив електромагнітних завад. Результати роботи мають практичне значення, оскільки дозволяють інтегрувати розроблені моделі у процес створення енергоефективних пристроїв, що є ключовими елементами Інтернету речей. Це сприяє підвищенню конкурентоспроможності таких рішень на ринку завдяки покращенню їх точності, надійності, стабільності та здатності функціонувати в умовах реальних експлуатаційних обмежень.

Ключові слова: фотодіодні сенсорні пристрої, сигнальний перетворювач, SPICE-моделювання, програмована система на кристалі.

УДК: 621.382

Вступ

Сучасний розвиток фотодіодних сенсорних пристроїв нерозривно пов'язаний із досягненнями в галузі аналогових та змішаних сигнальних систем, що базуються на концепції ПСнК. Такі

пристрої знайшли широке застосування в багатьох галузях, включаючи Інтернет речей (IoT), завдяки їх мініатюрності, низькій енергоємності та високій гнучкості використання [1, 2]. Важливим компонентом фотодіодних сенсорів є сигнальний перетворювач, який відповідає за точне перетворення струму фотодіода в напругу, що надалі використовується як інформативний сигнал [3].

Особливу роль у забезпеченні точності й стабільності сигнальних перетворювачів відіграють сучасні підходи до SPICE-моделювання (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Цей метод дозволяє досліджувати вплив паразитних параметрів, таких як ємність і опір фотодіодів [4], а також враховувати обмеження компонентної бази ПСнК [5]. Зокрема, SPICE-моделі надають змогу враховувати температурну нестабільність та інші фактори, які впливають на якість сигнального перетворення [6].

Складність розробки таких моделей обумовлена необхідністю врахування широкого спектра параметрів, включаючи частотні характеристики операційних підсилювачів та вплив паразитних ефектів, які можуть викликати коливання у сигнальному тракті [7]. Параметричний аналіз цих компонентів дозволяє визначати оптимальні режими роботи сенсорних пристроїв, зменшуючи вплив нестабільності та покращуючи енергоефективність [8].

Однак, реалізація високоточних сигнальних перетворювачів для фотодіодних сенсорів часто стикається з проблемами, пов'язаними з обмеженнями компонентів аналогового фронт-енду, таких як операційні підсилювачі та трансімпедансні підсилювачі. Їх частотні характеристики, включаючи ширину смуги пропускання (GBW), можуть суттєво змінюватися залежно від режиму потужності, що впливає на стабільність перетворення [9]. Крім того, паразитні ємності фотодіодів спричиняють зниження швидкості відгуку та стабільності роботи сигнального тракту, особливо за умов швидких змін фотоструму [10]. У цій роботі запропоновано основні підходи до моделювання сигнальних перетворювачів фотодіодних сенсорних пристроїв на основі SPICE-моделей. Представлені рішення включають синтез макромоделей компонентів аналогових кіл, параметричний аналіз сигнального перетворення та розроблення методів стабілізації характеристик з урахуванням обмежень компонентної бази ПСнК [11]. SPICE-моделі, що відповідають синтаксису програмного середовища Micro-Cap, дозволяють проводити детальний аналіз динамічних характеристик фотодіодів, включаючи їх вольт-амперні характеристики та перехідні процеси [12].

Запропоновані підходи спрямовані на оптимізацію параметрів сигнальних перетворювачів, зменшення похибок у процесі роботи сенсорів і забезпечення стабільності їх функціонування за різних умов експлуатації. Розроблені моделі можуть бути використані для вдосконалення енергоефективних пристроїв Інтернету речей, що потребують високої точності та стабільності.

2. Аналіз та постановка задачі

Розробка сигнальних перетворювачів для фотодіодних сенсорних пристроїв передбачає вирішення проблем, пов'язаних із впливом паразитних параметрів, температурної нестабільності та часової нестабільності сигнальних ланцюгів. Важливим завданням є забезпечення точності та стабільності перетворення струму фотодіода у вихідну напругу за умов динамічних змін фотоструму та впливу зовнішніх факторів. Для досягнення цих цілей необхідно провести параметричний аналіз компонентів сенсорних систем з врахуванням обмеження компонентної бази програмованих систем на кристалі (ПСнК).

Стабілізація характеристик сигнального перетворення ґрунтується на результатах моделювання та компенсації паразитних ефектів за допомогою SPICE-моделювання. У цьому контексті важливе місце посідає розробка макромоделей, що дозволяють детально аналізувати сигнальні процеси, враховуючи залежність параметрів від температури, паразитної ємності, опору та інші фактори, які впливають на якість функціонування фотодіодних сенсорів.

Для вирішення цієї проблематики в роботі поставлено такі задачі:

- здійснити параметричний аналіз трансімпедансного сигнального перетворювача на ПСнК;
- розробити макромодель фотодіодного перетворювача з врахуванням отриманих результатів аналізу;
- забезпечення сумісності розробленої моделі з SPICE-моделюванням, що використовується для аналізу параметрів компонентів;
- дослідити вплив паразитної модуляції фотодіода;
- дослідити залежність динамічних характеристик формування вихідної напруги в імпульсному режимі функціонування фотодіодних сенсорів від ємної та резистивної складових схеми заміщення.

Запропонована модель повинна враховувати параметричну модуляцію, теплові ефекти та часову нестабільність, що забезпечить стабільну роботу фотодіодних сенсорів у широкому діапазоні умов експлуатації.

3. Параметричний аналіз трансімпедансного підсилювача

Переважає більшість сучасних оптичних фотоелектронних сенсорних пристроїв базуються на основі фотодіодів. Принципи функціонування та схемотехнічні рішення фотодіодних сенсорів характеризуються широким різноманіттям. В сучасних рішеннях вбудованих систем сигнальний тракт (рис. 1) містить транс-імпедансний підсилювач (TIA, Trans-Impedance Amplifier), фільтр (Filter), аналого-цифровий перетворювач АЦП (ADC, Analog to Digit Converter) та його драйвер (ADC Driver), джерело опорної напруги (REF, Reference Voltage Source), інтерфейс (Interface) та мікроконтролер (Microcontroller). Ключовим компонентом аналогового фронт-енду фотодіодних сенсорних пристроїв, оскільки саме він забезпечує перетворення струму фотодіода у пропорційну напругу. Його основна функція полягає в «ідеальному» лінійному перетворенні струму фотодіода у вихідну напругу, яка в подальшому приймається інформативним сигналом сенсорного пристрою. Під «ідеальним» перетворенням розуміється властивість формування вихідної напруги V_{OUT} , яка є лінійною функцією фотоструму I_{PH} і в першому наближенні не залежить від вихідного опору фотодіода R_{PH} . Таким чином, функція перетворення $I_{PH} \rightarrow V_{OUT}$ характеризується високою лінійністю та широкою смугою частот.

Використання ПСнК для реалізації трансімпедансних підсилювачів (TIA) є перспективним напрямком розвитку сенсорної техніки. Очевидною перевагою ПСнК є їх мініатюрність, відповідність вимогам енергоефективної низьковольтної техніки, низька собівартість та висока гнучкість конфігурації. Основу концепції ПСнК складають універсальність, можливість структурно-параметричного реконфігурування, оперативного перепрограмування та широкий набір інтерфейсів.

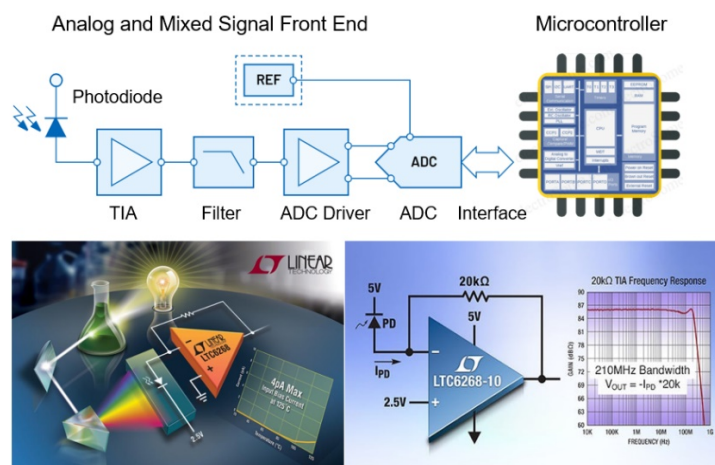


Рис. 1. Ілюстрація узагальненої структурної схеми та приклад реалізації вбудованої системи фотодіодних сенсорних пристроїв

Попри численні переваги, параметри аналогового та змішаного сигнального фронт-енду ПСнК є обмеженими, що накладає певні обмеження на реалізацію ТІА. В першу чергу це пов'язано з частотними характеристиками вбудованих операційних підсилювачів системи.

Зокрема, на рис. 2 представлена ілюстрація функціональності та основних частотних характеристик операційного підсилювача OpAmp PSoC 5 компанії Infineon Technologies (Cypress Semiconductor).

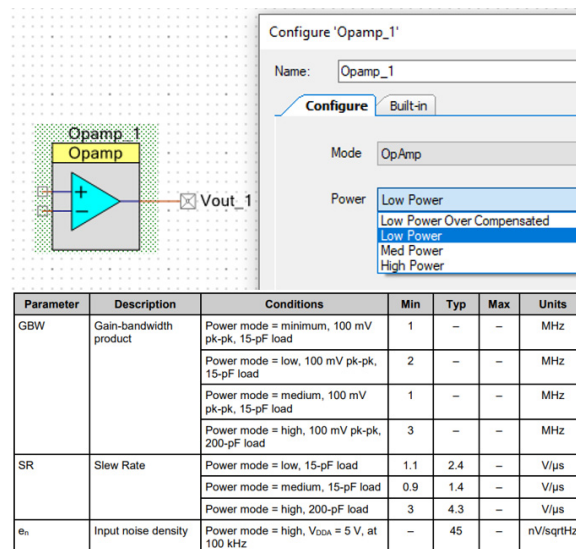


Рис. 2. Параметри OpAmp PSoC 5

В процесі структурно-параметричного реконфігурування OpAmp передбачена можливість вибору режиму потужності P споживання (Power Mode) – Low Power (низька P), Med Power (середня P), High Power (висока P). Показано, що основний частотний параметр GBW (Gain Bandwidth Product – смуга частот на рівні одиничного підсилення) в режимі високої потужності (Power Mode = high) становить 3 МГц, а при зменшенні потужності – зменшується до 1 МГц. Аналогічно, погіршуються і інші характеристики, зокрема SR (Slew Rate – швидкість наростання чи спадання вихідної напруги) – з 3 В/мкс (Power Mode = high) до 0,9...1,1 В/мкс при зменшенні потужності. Ті ж самі закономірності мають місце і в інших компонентах аналогового фронт-енду – підсилювачах з керованим коефіцієнтом підсилення (PGA, Program Gain Amplifier) (рис. 3) та транс-імпедансних підсилювачах (TIA) (рис. 4).

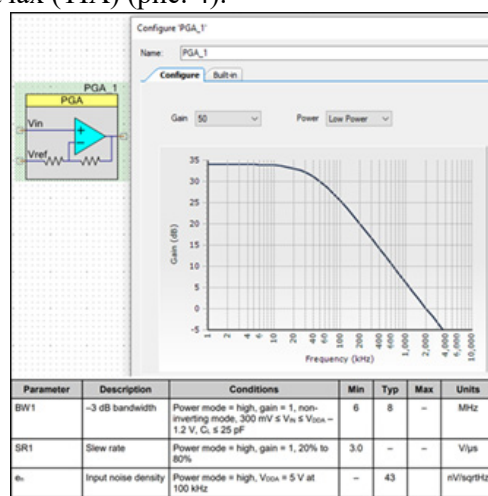


Рис. 3. Параметри PGA PSoC 5

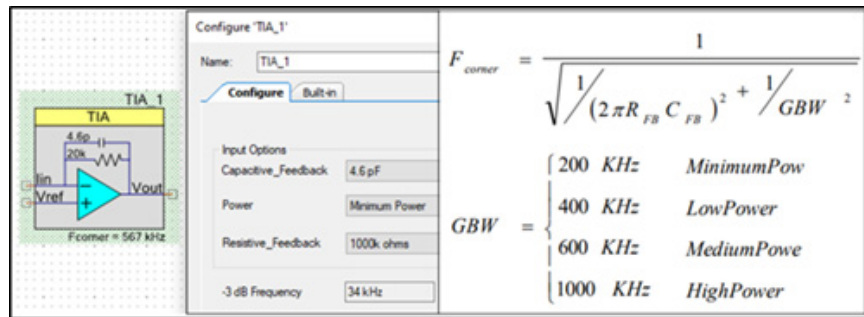


Рис. 4. Параметри TIA PSoC 5

Такі невисокі характеристики компонентів аналогового фронт-енду критично обмежують можливості реалізації сигнальних перетворювачів фотодіодних сенсорів. Зокрема, в ході представленого параметричного аналізу показано, що перехідна функція встановлення вихідної напруги реальних компонентів трансімпедансних підсилювачів характеризується значною нестабільністю. Її основними причинами є, як вищезгадане обмеження частотної характеристики OpAmp та TIA, так і паразитна ємність структури фотодіода. Дані особливості функціонування операційних підсилювачів слід враховувати в процесі моделювання сигнального перетворювача.

4. Синтез SPICE макромоделі фотодіода

На основі результатів параметричного аналізу трансімпедансних підсилювачів на основі ПСнК синтезовано SPICE макромодель фотодіода, яка базується на схемі заміщення, представлений на рис. 5. Функціональний та параметричний аналіз проводиться з використанням методів математичного моделювання на базі SPICE макромоделей. Використовувався пакет програм Micro-Cap 12 (Evaluation and Freeware Versions)

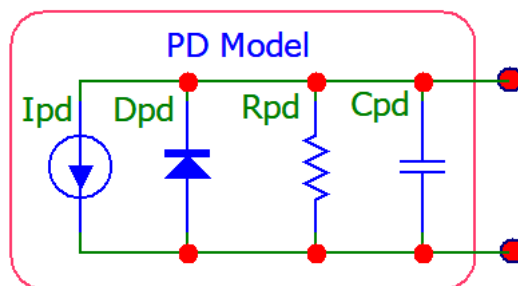


Рис. 5. Схема заміщення SPICE макромоделі фотодіода

Розглянемо основні моделі компонентів, що використовувалися в процесі модельних досліджень. Спершу синтезуємо схему заміщення SPICE макромоделі фотодіода (рис. 5) та проведемо специфікацію параметрів її компонентів.

Розроблена макромодель складається з електрофізичної моделі діодної структури Dpd, мультифункціонального джерела струму Ipdc та шунтуючих резистора Rpd та конденсатора Cpdc. Мультифункціональне джерело струму забезпечує можливість вибору функції вихідного сигналу, зокрема: None (Елементарний тип), Pulse (Джерело імпульсного струму), Sin (Джерело синусоїдального струму) тощо. В даній макромоделі джерело струму Ipdc формує фотостумову, резистор Rpd – активну (омічну), а конденсатор Cpdc – реактивну (ємнісну) складові сигналу.

Для специфікації параметрів компонентів моделі використовувалися експериментальні дані та чисельні симуляції. Параметри специфікацій SPICE моделей діодної структури та мультифункціонального джерела струму показано на рис.6 а та рис.6 б, відповідно. У моделі передбачено можливість варіації таких параметрів, як паразитна ємність (Cpdc), активний опір (Rpd)

та фотострум (I_{pd}), що дозволяє врахувати вплив зовнішніх умов та конструктивних особливостей фотодіода.

Для верифікації моделі проведено параметричний аналіз вольт-амперних характеристик фотодіода для набору значень $I_{pd} = 0..1E-4$ А (рис.7а) при $R_{pd} = 1E8$ Ом, що демонструє залежність фотоструму від напруги.

Зменшення добротності та зростання паразитних ефектів, що еквівалентно зменшенню опору R_{pd} до $1E5$ Ом, призводить до зміни ВАХ(рис.7б).

Результати моделювання динамічних властивостей фотодіода представлено на рис. 8. Зокрема, на рис. 8 а представлено перехідні характеристики при різних значеннях C_{pd} ($1E-11$, $3E-11$, $1E-10$ Ф), які показують вплив ємнісної складової на час встановлення вихідної напруги.

На рис. 8 б проаналізовано аналогічні перехідні процеси при збільшенні R_{pd} до $1E10$ Ом, що демонструє вплив активного опору на динамічні характеристики.

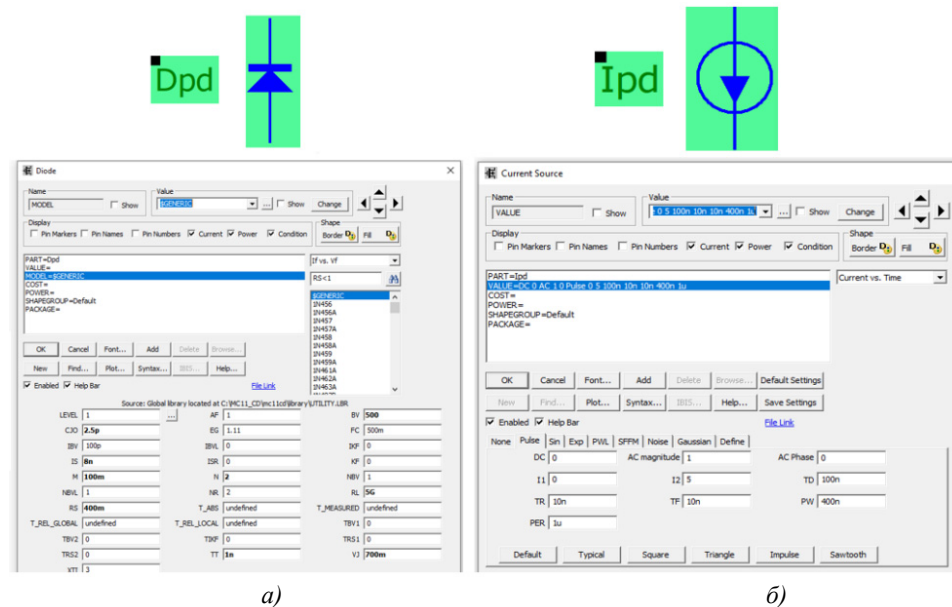


Рис. 6. Вікна специфікації SPICE моделей діодної структури (а) та мультифункціонального джерела струму (б)

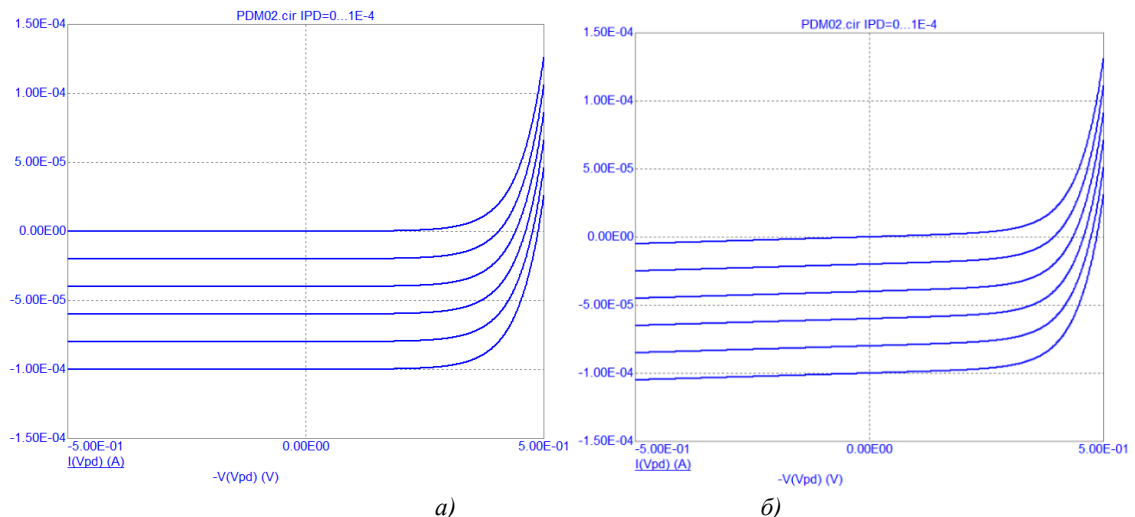


Рис. 7. ВАХ фотодіода: а - при $R_{pd} = 1E8$ Ом для набору значень $I_{pd} = 0..1E-4$ А; б - при $R_{pd} = 1E5$ Ом для набору значень $I_{pd} = 0..1E-4$ А

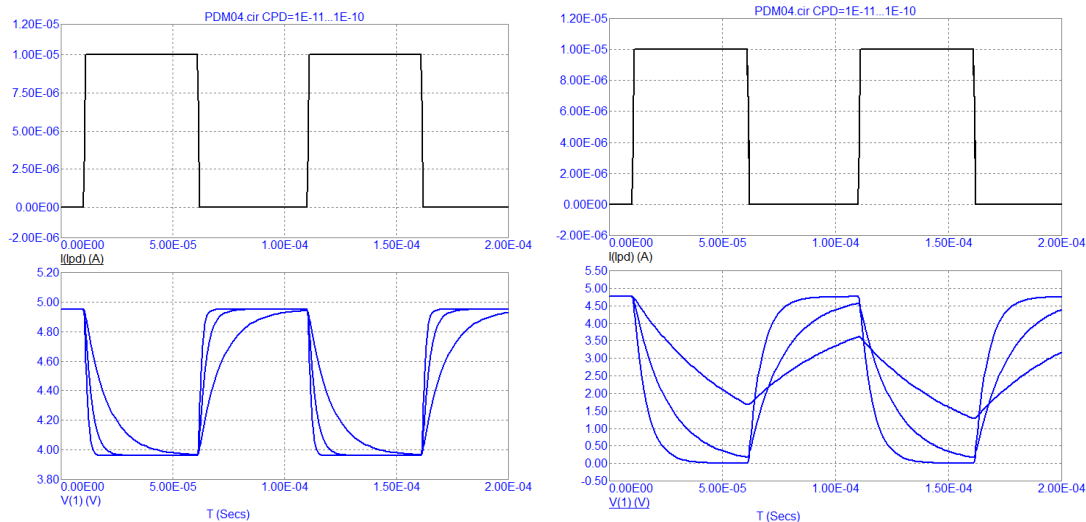


Рис. 8. Перехідні (Transient) характеристики фотодіода: а - при $R1 = 1E5 \text{ Ом}$, $Cpd = 1E-11, 3E-11, 1E-10 \text{ Ф}$, $Rpd = 1E7 \text{ Ом}$; б - при $R1 = 1E5 \text{ Ом}$, $Cpd = 1E-11, 3E-11, 1E-10 \text{ Ф}$, $Rpd = 1E10 \text{ Ом}$

На цих прикладах дослідження фотодіодів можна спостерігати характерний процес переходу від прямої до зворотної вітки ВАХ (рис. 7 а), ефект паразитної модуляції зворотної вітки ВАХ (залежності фотоструму від зворотної напруги) при зменшенні добротності фотодіодів (рис. 7 б), залежність динамічних характеристик формування вихідної напруги в імпульсному режимі функціонування фотодіодних сенсорів ємнісної складової Cpd (рис. 8 а) та резистивної складової Rpd (рис. 8 б) схеми заміщення.

Розроблена SPICE макромодель фотодіода забезпечує можливість точного параметричного аналізу, дозволяючи моделювати вплив паразитних параметрів, температурної нестабільності та інших факторів на роботу фотодіодів. Це відкриває нові можливості для оптимізації роботи сенсорних пристроїв у різних умовах експлуатації.

Висновки

Актуальність дослідження обумовлена стрімким розвитком фотодіодних сенсорних пристроїв, що є ключовими елементами сучасних систем збору та обробки інформації, зокрема в контексті Інтернету речей. Забезпечення точності та стабільності їх роботи є критично важливим для надійності та ефективності цих систем. Використання ПСнК для реалізації сигнальних перетворювачів є перспективним напрямом, проте обмеження параметрів вбудованих компонентів та вплив паразитних параметрів створюють значні виклики для досягнення високих характеристик сенсорних пристроїв.

Результати проведених досліджень продемонстрували ефективність використання SPICE-моделювання для аналізу та оптимізації сигнальних перетворювачів фотодіодних сенсорів на базі ПСнК. Параметричний аналіз трансїмпедансних підсилювачів виявив ключові обмеження, пов'язані з їх частотними характеристиками та режимами потужності. Розроблена SPICE-макромодель фотодіода, яка враховує паразитні ємності та опори, дозволила детально дослідити динамічні характеристики фотодіода та їх залежність від різних параметрів. Верифікація моделі підтвердила її адекватність та можливість використання для точного моделювання процесів сигнального перетворення.

Розроблені SPICE-моделі та методики параметричного аналізу можуть бути безпосередньо інтегровані в процес розробки та оптимізації сигнальних перетворювачів для фотодіодних сенсорних пристроїв на ПСнК. Це дозволить на етапі проектування враховувати вплив паразитних факторів, вибирати оптимальні структурно-параметричні рішення та забезпечувати стабільну та енергоефективну роботу сенсорних систем. Отримані результати сприятимуть підвищенню

точності та надійності сенсорних пристроїв для широкого спектру застосувань, зокрема в енергоефективних системах Інтернету речей, медичній діагностиці, промисловій автоматизації та інших галузях, де важлива якість та стабільність вимірювання світлових сигналів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку методів компенсації паразитних ефектів, інтеграцію моделі з іншими компонентами сенсорного тракту та розширення її функціональності для врахування шумових характеристик та температурної нестабільності.

Список використаних літературних джерел

- [1]. Xu, W., Chen, J., Kuang, Z., Zhou, L., Chen, M. and Zhang, C. (2022) 'A low-power high-quality CMOS image sensor using 1.5 V 4T pinned photodiode and dual-CDS column-parallel single-slope ADC', *Journal of Semiconductors*, 43(8), p. 082401. doi: 10.1088/1674-4926/43/8/082401.
- [2]. Mohan, N., Awwad, F., Albastaki, N. and Atef, M. (2024) 'A Low-Power High-Sensitivity Photocurrent Sensory Circuit with Capacitive Feedback Transimpedance for Photoplethysmography Sensing', *Sensors*, 24(13), p. 4097. doi: 10.3390/s24134097.
- [3]. Masnad, M.M., Safaee, S.M.R., Najeeb, N., Mojaver, K.R., Fouda, M., Peinke, E. ma Liboiron-Ladouceur, O. (2024) 'Scalable Photonic Digital-to-Analog Converters', *Photonics*, 11(2), c. 112. doi: 10.3390/photonics11020112.
- [4]. R. Lin, J. Tsai, D. Buso and G. Zissis, "OLED equivalent circuit model with temperature coefficient and intrinsic capacitor," 2014 IEEE Industry Application Society Annual Meeting, 2014, pp. 1-8, doi: 10.1109/IAS.2014.6978436.
- [5]. Barylo, G.I., Boyko, O.V., Gelzynskyy, I.I., Holyaka, R.L. Khilchuk, M.V. (2022) 'Programmable Mixed Signal Front-End for Sensor Applications', *Proceedings of the 2022 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Lviv-Slavske, Ukraine, pp. 482–485. doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9766863.
- [6]. Al-Ahdal, A., Al-Ahdal, A., Al-Sarawi, S. ma Abbott, D. (2019) 'Modeling and simulation of temporal and temperature drift for the development of an accurate ISFET SPICE macromodel', *Journal of Computational Electronics*, 18(4), c. 1234–1244. doi: 10.1007/s10825-019-01425-0.
- [7]. Bendre, V.S. ma Kureshi, A.K. (2017) 'An Overview of Negative Feedback Compensation Techniques for Operational Transconductance Amplifiers', 2017 International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA), Pune, India, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICCUBEA.2017.8463683.
- [8]. Zhang, L., Yamashita, T., Crook, M., Warburton, R. ma Hadfield, R.H. (2018) 'Optical Transition Edge Sensors: Wavelength Dependence of Energy Resolution', 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018), Paris, France, pp. 1–2. doi: 10.1109/CPEM.2018.8501179.
- [9]. Gajare, M., Shedge, D.K. ma Itole, D. (2021) 'CMOS Transimpedance Feedback Amplifier Design using Unity Gain Differential Amplifiers', 2021 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI), Pune, India, pp. 1–5. doi: 10.1109/ESCI50559.2021.9396931.
- [10]. Achtenberg, M., Mikołajczyk, J., Wróbel, Z. ma Wójcik, M. (2021) 'Low-frequency noise measurements of IR photodetectors with voltage cross-correlation system', *Measurement*, 182, 109867. doi: 10.1016/j.measurement.2021.109867.
- [11]. Barylo, H., Boyko, O., Helzhynskyy, I., Holyaka, R., Marusenкова, T. ma Ivakh, M. (2021) 'Universal hardware and software system of signal converting for integrated sensor devices implementation', *Proceedings of the 2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Lviv, Ukraine, pp. 58–62. doi: 10.1109/CADSM52681.2021.9385254.
- [12]. Jung, W. (2015) 'A SPICE op amp macromodel', *y Analog Circuit Design*. Elsevier, c. 967–968. doi: 10.1016/B978-0-12-800001-4.00452-X.

MODELING OF THE SIGNAL CONVERTER FOR PHOTODIODE SENSOR DEVICES

Hryhorii Barylo, Roman Holiaka, Petro Brych, Mykhailo Pavlenko, Teodor Onutchak

Lviv Polytechnic National University, S. Bandery Str., 12, 79013, Lviv, Ukraine

The article explores approaches to implementing a signal converter for photodiode sensor devices within the concept of programmable systems-on-chip (PSoC), representing a promising direction in the development of modern sensor systems. Particular attention is paid to the application of

SPICE modeling, which enables high-precision analysis of photodiode parameters and analog front-end components. One of the key features of the proposed models is the inclusion of parasitic parameters of photodiodes, such as parasitic capacitance and resistance, which significantly affect the accuracy and stability of signal conversion processes. The study also examines the impact of temperature instability, an essential factor limiting the efficiency of sensor devices. Methods for parametric analysis of signal converters are proposed, allowing not only the assessment of the influence of component parameters but also the identification of key patterns in the emergence of errors during signal conversion. The developed models were validated through SPICE simulations, which demonstrate the effects of parameter variations on the frequency response, time stability, and energy efficiency of signal circuits. An extended modeling analysis includes a detailed study of transient processes, particularly the behavior of photodiodes under various operating modes. The dynamics of charging and discharging parasitic capacitances and their influence on the overall performance of the circuit were investigated. To improve modeling accuracy, both the structural characteristics of photodiodes and the parameters of operational amplifiers within the signal path were taken into account. The main nodes of the signal converters were optimized through structural and parametric tuning of the SSC components. The results of the study demonstrate that the developed SPICE models minimize the influence of parasitic factors and ensure the stable operation of sensor devices, even under elevated temperatures and other challenging operating conditions. Additionally, the impact of parameter variations on signal nonlinearity was studied, and recommendations were provided for selecting optimal component values to enhance the energy efficiency of circuits. The proposed models can be integrated into the development of energy-efficient devices and components for the Internet of Things (IoT) ecosystem, increasing their competitiveness in the modern market.

Keywords: *photodiode sensor devices, signal converter, SPICE modeling, programmable system-on-chip.*