

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.383

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/54>

Барило Н.Г.

<https://orcid.org/0000-0002-9101-3768>

Національний університет «Львівська політехніка»

Брич М.В.

<https://orcid.org/0009-0004-9767-5991>

Національний університет «Львівська політехніка»

Пришляк С.О.

<https://orcid.org/0009-0001-6514-1141>

Національний університет «Львівська політехніка»

Брич П.В.

<https://orcid.org/0009-0003-8213-8897>

Національний університет «Львівська політехніка»

Акопян В.Г.

<https://orcid.org/0009-0002-7130-037X>

Національний університет «Львівська політехніка»

Марків Д.В.

<https://orcid.org/0009-0006-7744-8825>

Національний університет «Львівська політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ФОТОСЕНСОРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МУЛЬТИПЛІКАТИВНО-ІНТЕГРАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

У статті запропоновано підхід до моделювання спектральних фотосенсорів на основі мультиплікативно-інтегрального перетворення спектральних характеристик. Актуальність дослідження зумовлена зростаючим застосуванням спектральних фотодіодних сенсорів у сучасних оптоелектронних і сенсорних системах, де вирішальне значення мають точність вимірювань, стабільність параметрів та стійкість до змін умов функціонування. Традиційні методи моделювання зазвичай орієнтовані на аналіз локальних спектральних ознак або миттєвих значень сигналів, що обмежує можливості комплексного опису процесу формування інформативного сигналу.

Запропонований підхід базується на розгляді формування інформативного сигналу як результату спектральної взаємодії джерела випромінювання, оптичного середовища та фоточутливого елемента. Мультиплікативно-інтегральна модель дозволяє інтерпретувати інтегральний фотострум як узагальнену інформативну ознаку, що відображає спектральне перекриття основних складових сенсорної системи в заданому діапазоні довжин хвиль.

Для забезпечення практичного аналізу та чисельного моделювання спектральні характеристики окремих елементів подано у параметричній аналітичній формі, що забезпечує узгодженість графічного та математичного представлення спектральних залежностей і спрощує варіаційний аналіз параметрів. Запропонована модель орієнтована на аналіз інтегральних характеристик сигналу, що забезпечує підвищену стійкість до шумів, фонових освітлень та інших дестабілізуючих факторів.

© Барило Н.Г., Брич М.В., Пришляк С.О. та ін., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0



Реалізацію мультиплікативно-інтегральної моделі виконано у SPICE-орієнтованому середовищі шляхом подання спектральних складових у вигляді функціональних блоків з мультиплікативною взаємодією та подальшим інтегруванням результату. Результати моделювання демонструють чутливість інтегрального фотоструму до варіацій спектральних параметрів, зокрема зсуву спектральних максимумів і зміни ширини спектральних смуг, а також до впливу дестабілізуючих факторів, пов'язаних із дрейфом параметрів і деградацією елементів.

Отримані результати підтверджують доцільність використання запропонованого підходу як уніфікованого інструменту для аналізу, оптимізації та оцінювання стабільності спектральних фотосенсорів і створюють підґрунтя для подальшого розвитку оптоелектронних сенсорних систем з підвищеними функціональними та діагностичними можливостями.

Ключові слова: спектральний фотосенсор, фотодіодний сенсор, мультиплікативно-інтегральна модель, SPICE-моделювання, оптоелектронні сенсорні системи.

Постановка проблеми. Спектральні фотосенсори широко застосовуються в сучасних електронних системах хімічного, біохімічного та медико-біологічного аналізу, а також у вбудованих сенсорних системах моніторингу параметрів середовища. Вони є ключовими елементами кіберфізичних систем, орієнтованих на концепції Інтернету речей, індустріальних і медичних IoT-рішень та «розумних» лабораторій, у яких особливого значення набувають стабільність, відтворюваність і енергоефективність вимірювальних процесів [1–3].

Інформативні сигнали спектральних фотосенсорів формуються внаслідок взаємодії спектральних характеристик джерела випромінювання, досліджуваного оптичного середовища та фоточутливого елемента. У реальних умовах експлуатації ці складові зазнають впливу технологічного розкиду параметрів, температурного дрейфу та часової деградації, що призводить до варіабельності фотоструму та зниження відтворюваності вимірювань [4].

Додаткові ускладнення зумовлені впливом паразитного зовнішнього освітлення та спектральних перекриттів, які формують інтерференційну складову фотоструму і суттєво ускладнюють його селекцію апаратними методами [5].

Вимоги до низького енергоспоживання сучасних вбудованих сенсорних систем обмежують інтенсивність корисного світлового потоку, що призводить до зниження відношення сигнал/завада та підвищує чутливість до зовнішніх дестабілізуючих факторів [6, 7].

У зв'язку з цим актуальною науково-технічною задачею є розроблення моделей спектральних фотосенсорів, які дозволяють формалізувати процес формування фотоструму з урахуванням мультиплікативної взаємодії спектральних складових та інтегрального характеру фотоперетворення, а також оцінювати вплив дестабілізуючих факторів у рамках модельних досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Сучасні дослідження в галузі спектральних фотосенсорів спрямовані на підвищення селективності, чутливості та стабільності вимірювальних каналів шляхом оптимізації спектральних характеристик світлодіодних джерел випромінювання та фотодіодів. Такі підходи активно застосовуються у вбудованих та IoT-системах, зокрема в інтелектуальних лабораторних і кіберфізичних середовищах [1, 3, 9].

Разом із тим більшість відомих методів базуються на експериментальній калібровці або аналізі окремих елементів сенсорної системи без урахування повного ланцюга формування інформативного сигналу. Зокрема, інтегральний характер фотоструму та вплив спектральних перекриттів часто розглядаються спрощено [8].

Перспективним напрямком є використання математичних моделей, у яких формування інформативного сигналу описується мультиплікативною взаємодією спектральних складових джерела випромінювання, середовища та фотосенсора. Ефективність таких підходів показана в роботах, присвячених мультиплікативним моделям спектрального сигналу [10].

Для схемотехнічного аналізу сенсорних систем широко застосовуються SPICE-орієнтовані підходи, які дозволяють враховувати електричні параметри сигнальних трактів, шумові складові та температурні фактори [11]. Водночас більшість таких моделей не поєднують електричні параметри зі спектральними характеристиками фотосенсорів у єдиному модельному середовищі.

Запропонований у даній роботі підхід розвиває ідеї, викладені в попередніх дослідженнях авторів, та спрямований на поєднання мультиплікативно-інтегрального опису процесу фотоперетворення зі схемотехнічним моделюванням спектральних фотосенсорів [12].

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення та дослідження моделі спектрального

фотосенсора на основі мультиплікативно-інтегрального опису процесу формування фотоструму, яка дозволяє враховувати взаємодію спектральних характеристик джерела випромінювання, оптичного середовища та фоточутливого елемента, а також оцінювати вплив дестабілізуючих факторів у рамках модельних та схемотехнічних досліджень.

Виклад основного матеріалу. Процес формування інформативного сигналу спектрального фотосенсора доцільно розглядати як результат взаємодії спектральних характеристик джерела випромінювання, оптичних властивостей досліджуваного середовища та спектральної чутливості фоточутливого елемента. Кожна з цих складових формує власний спектральний внесок, а результуючий сигнал визначається їх сумарною дією в заданому спектральному діапазоні.

На рис. 1 наведено узагальнену ілюстрацію досліджень у галузі спектральних фотосенсорів, яка відображає концепцію формування інформативного сигналу як результату послідовного спектрального перетворення. Показано спектральні характеристики джерела випромінювання $A(\lambda)$, оптичного середовища $M(\lambda)$ та фотосенсора $S(\lambda)$, а також етапи їх аналітичної апроксимації та подальшої мультиплікативної взаємодії з інтегруванням за довжиною хвилі.

У межах такого підходу інформативний сигнал спектрального фотосенсора описується мультиплікативно-інтегральною залежністю:

$$I_{ph} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} A(\lambda)M(\lambda)S(\lambda)d\lambda, \quad (1)$$

де $A(\lambda)$ – спектральна характеристика джерела випромінювання, $M(\lambda)$ – спектральна передавальна функція оптичного середовища, $S(\lambda)$ – спектральна чутливість фотосенсора, λ – довжина хвилі оптичного випромінювання, $d\lambda$ – елементарний інтервал спектральної області інтегрування.

Для забезпечення зручності параметричного аналізу та подальшого схемотехнічного моделювання спектральні характеристики джерела випромінювання та фотосенсора доцільно апроксимувати аналітичними функціями. У даній роботі використано апроксимацію у вигляді функцій нормального розподілу, що дозволяє з достатньою точністю описувати реальні спектральні залежності світлодіодів і фотодіодів та водночас зберігати простоту параметризації.

Загальний вигляд апроксимаційної функції описується виразом:

$$G(\lambda) = K \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

де λ_0 – визначає положення спектрального максимуму, σ – характеризує ефективну ширину спектральної смуги, K – коефіцієнт нормування, що відповідає амплітуді спектральної характеристики.

Використання такої апроксимації дозволяє досліджувати вплив зсуву спектральних максимумів, зміни ширини спектральних смуг та варіацій

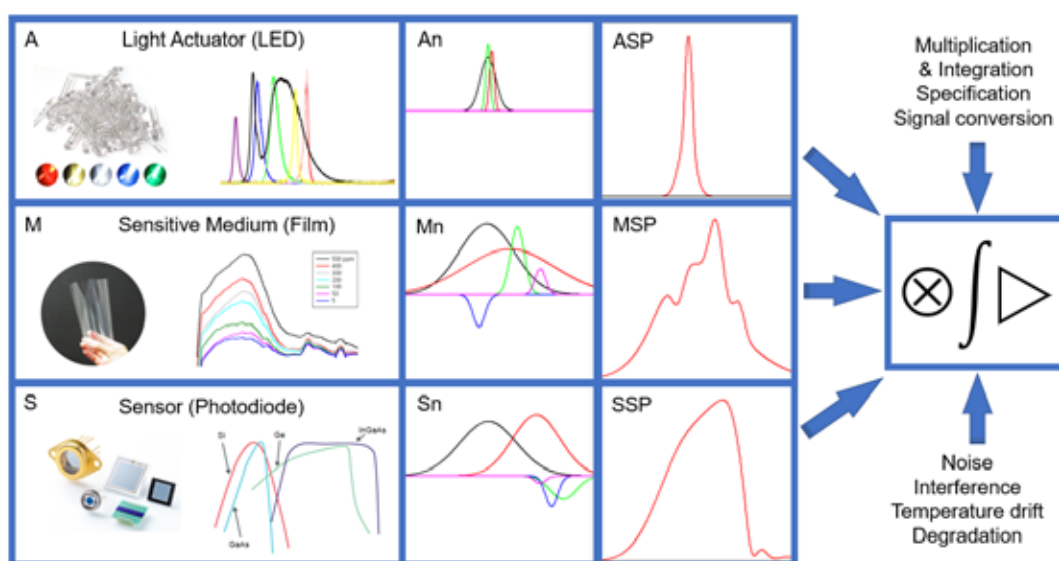


Рис. 1. Ілюстрація досліджень в галузі спектральних фотосенсорів

амплітуди на значення інтегрального фотоструму I_{ph} . Це є принципово важливим для аналізу температурного дрейфу, технологічного розкиду параметрів і деградації елементів сенсорної системи.

У запропонованій моделі інтегральний фотострум I_{ph} розглядається не як безпосередній результат фотоперетворення, а як узагальнена інформативна ознака, що відображає спектральну взаємодію джерела випромінювання, оптичного середовища та фоточутливого елемента. На відміну від підходів, орієнтованих на аналіз окремих спектральних максимумів або локальних значень сигналу, інформація в даній моделі закладена в інтегральному результаті спектрального перекриття.

Зміна параметрів будь-якої зі спектральних складових – положення центральної довжини хвилі, ширини спектральної смуги або амплітуди – призводить до характерної зміни інтегрального фотоструму, що може бути використано для ідентифікації стану оптичного середовища, фотосенсора або джерела випромінювання. Формування інформативної ознаки на рівні спектрально-інтегральної оцінки знижує чутливість моделі до випадкових шумових складових і паразитного фонового освітлення, які мають інший спектральний розподіл.

Параметричне подання спектральних характеристик у вигляді аналітичних функцій дозволяє пов'язати зміни параметрів λ_0 та σ з фізичними процесами температурного дрейфу, технологічного розкиду та деградації елементів сенсорної системи. Таким чином, інтегральний фотострум I_{ph} може використовуватися як комплексний показник функціонального стану спектрального фотосенсора.

Запропонована мультиплікативно-інтегральна модель є зручною для реалізації у середовищах схемотехнічного моделювання. Аналітичний опис спектральних характеристик дозволяє представити їх у вигляді функціональних блоків, безпосередньо придатних для використання в SPICE-орієнтованих симуляторах.

На рис. 2 наведено функціональну схему SPICE-моделі спектрального фотосенсора, у якій спектральні складові $A(\lambda)$, $M(\lambda)$ та $S(\lambda)$ представлені у вигляді параметричних блоків, а їх мультиплікативна взаємодія реалізується за допомогою керованих джерел сигналів.

Інтегральний характер фотоперетворення в моделі реалізується шляхом накопичення результату мультиплікативної взаємодії спектральних компонент, що дозволяє інтерпретувати інтегральний фотострум як електричну величину, сумісну з подальшим аналізом сигнальних трактів. Відповідний інтегральний сигнал на виході SPICE-макромоделі наведено на рис. 3.

На рис. 4 наведено результати моделювання, які ілюструють зміну інтегрального сигналу при варіації параметрів аналітичної апроксимації спектральних характеристик, зокрема положення спектральних максимумів і ширини спектральних смуг. Отримані результати демонструють чутливість моделі до спектральних зсувів і підтверджують можливість використання інтегрального фотоструму як інформативної ознаки стану сенсорної системи.

На рис. 5 наведено результати моделювання впливу дестабілізуючих факторів, зокрема змін параметрів, що можуть відповідати температурному дрейфу або деградації елементів. Показано, що навіть за незначних варіацій

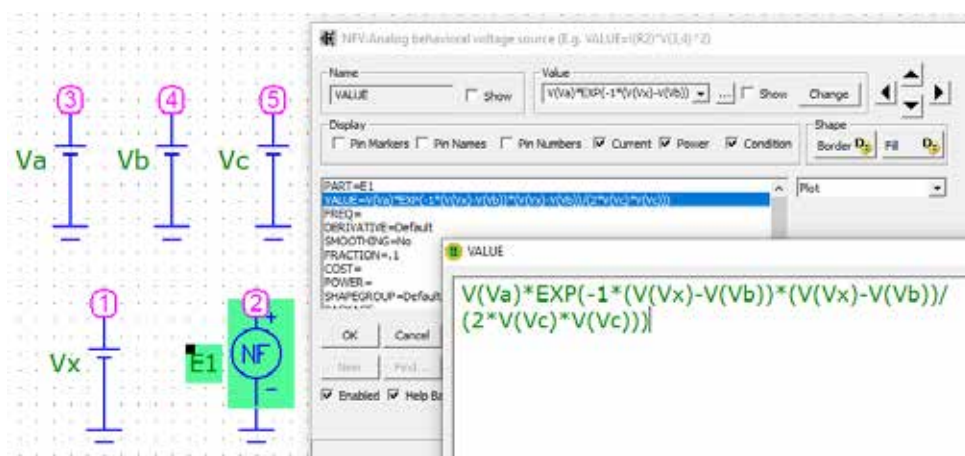


Рис. 2. SPICE-орієнтована функціональна модель спектрального фотосенсора з реалізацією мультиплікативної взаємодії спектральних складових та інтегрування результату

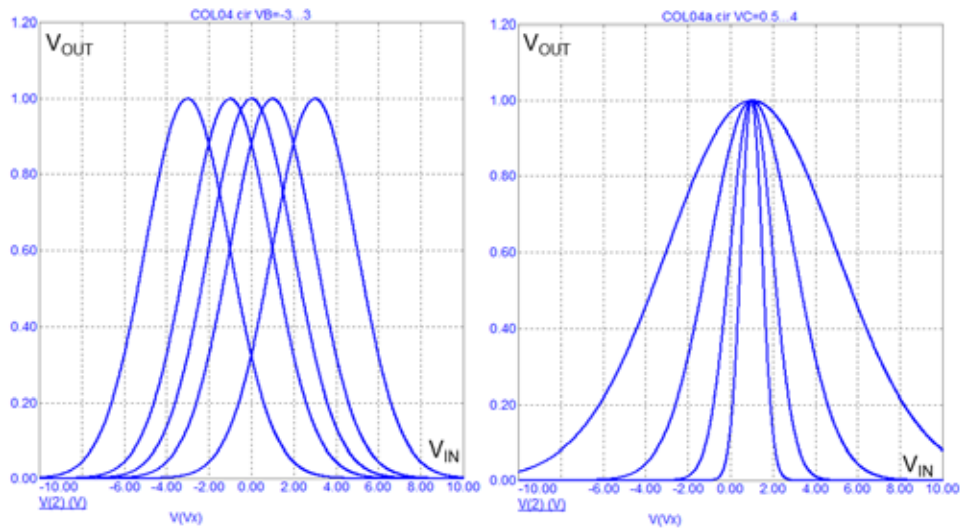


Рис. 3. Вихідний інтегральний сигнал SPICE-макромоделі спектрального фотосенсора

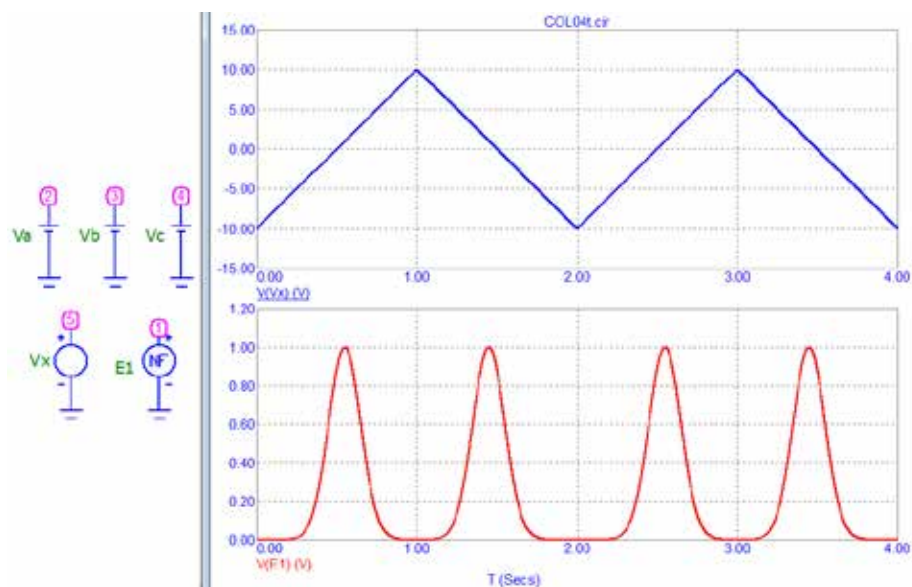


Рис. 4. Зміна інтегрального сигналу спектрального фотосенсора при варіації параметрів спектральних характеристик

спектральних характеристик модель дозволяє виявляти характерні зміни інтегрального фотоструму, що є важливим для задач діагностики та оцінювання стабільності роботи спектральних фотосенсорів.

Таким чином, SPICE-орієнтована реалізація мультиплікативно-інтегральної моделі забезпечує можливість комплексного аналізу спектральних і електронних факторів у межах єдиного модельного середовища та створює передумови для оптимізації параметрів сенсорних систем на етапі проектування.

Висновки. У роботі розглянуто підхід до моделювання спектральних фотосенсорів на основі

мультиплікативно-інтегрального поєднання спектральних характеристик джерела випромінювання, оптичного середовища та фоточутливого елемента. Формування інформативного сигналу описано як результат їх спектральної взаємодії в заданому діапазоні довжин хвиль.

Запропонована мультиплікативно-інтегральна модель забезпечує узгоджений математичний опис процесів спектрального фотоперетворення та дозволяє використовувати інтегральний фотострум як інформативну ознаку, чутливу до змін спектральних параметрів сенсорної системи.

Показано можливість параметричної аналітичної апроксимації спектральних характеристик, що

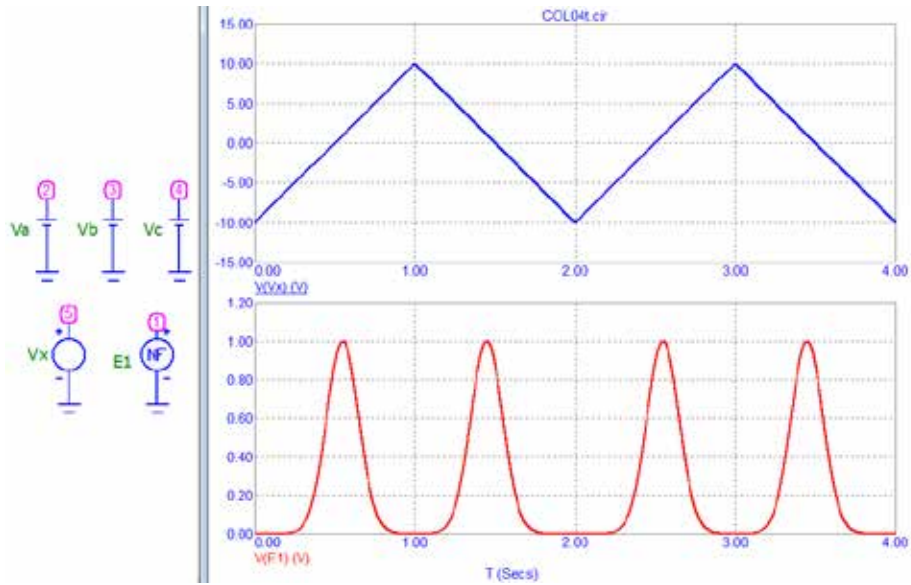


Рис. 4. Зміна інтегрального сигналу спектрального фотосенсора при варіації параметрів спектральних характеристик

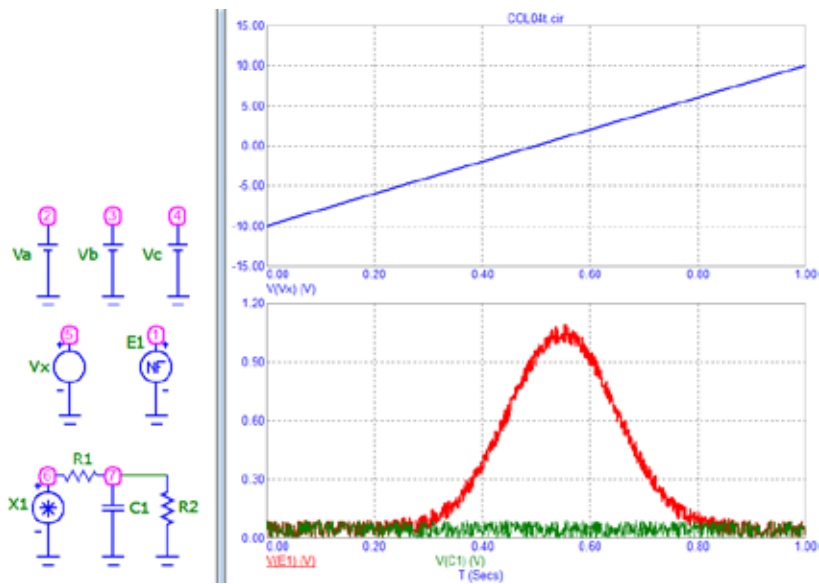


Рис. 5. Вплив дестабілізуючих факторів на формування інтегрального сигналу спектрального фотосенсора

спрощує чисельний аналіз та забезпечує реалізацію моделі у середовищах схмотехнічного моделювання. SPICE-орієнтована реалізація дозволяє враховувати параметричні варіації спектральних складових при аналізі формування інтегрального сигналу.

Результати моделювання підтверджують чутливість інтегрального фотоструму до зсувів спек-

тральних максимумів, змін ширини спектральних смуг, а також до дестабілізуючих факторів, пов'язаних із температурним дрейфом і деградацією елементів фотосенсорної системи.

Запропонований підхід може бути використаний при схмотехнічному моделюванні та аналізі спектральних фотосенсорів оптоелектронного призначення.

Список літератури:

1. Gounella R., Ferreira G. M., Amorim M. L. M., Soares J. N., Carmo J. P. A review of optical sensors in CMOS. *Electronics*. 2024. Pp. 691. <https://doi.org/10.3390/electronics13040691>
2. Pendão C., Silva I. Optical fiber sensors and sensing networks: overview of the main principles and applications. *Sensors*. 2022. Pp. 7554. <https://doi.org/10.3390/s22197554>
3. Al-Ashwal N. H., Al Soufy K. A. M., Hamza M. E., Swillam M. A. Deep Learning for Optical Sensor Applications: A Review. *Sensors*. 2023. Pp. 6486. <https://doi.org/10.3390/s23146486>
4. Hamamatsu Photonics K.K. Photodiode Technical Information. *Hamamatsu*, 2020. URL: <https://www.hamamatsu.com> (дата звернення: 20.01.2026)
5. He M., Han X., Han J., Guo L., Li C., Han C., Yu H., Gou J., Wu Z., Wang J. Dual-band organic photodetectors with low spectral overlap for dual-channel communications. *Proceedings of SPIE*. 2025. Pp. 1351151. <https://doi.org/10.1117/12.3057129>
6. Mandal S., et al. Low-power optical sensors for embedded and IoT systems. *Microelectronics Journal*. 2021. Pp. 105286. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2021.105286>
7. Reverter F. Direct interface circuits for sensors. *Smart Sensors and MEMS: Intelligent Devices and Microsystems for Industrial Applications*. 2014. Pp. 27–62. <https://doi.org/10.1533/9780857099297.1.27>
8. Wei Y., Lehmann T., Silvestri L., Wang H., Ladouceur F. Photodiode working in zero-mode: detecting light power change with DC rejection and AC amplification. *Optics Express*. 2021. Pp. 18915–18931. <https://doi.org/10.1364/OE.426503>
9. Guo D., Lin R., Wang W. Gaussian-optics-based optical modeling and characterization of a Fabry–Perot microcavity for sensing applications. *Journal of the Optical Society of America A*. 2005. Pp. 1577–1588. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.22.001577>
10. Купченко Л. Ф., Карлов В. Д., Риб'як А. С., Гурін О. О., Пономарь А. В. Активна оптико-електронна система виявлення об'єктів з використанням динамічної спектральної обробки оптичного випромінювання. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2021. Т. 24, № 2. С. 218–226. <https://doi.org/10.15407/spqeo24.02.218>
11. Ye Y., Ullrick T., Bogaerts W., Dhaene T., Spina D. SPICE-Compatible Equivalent Circuit Models for Accurate Time-Domain Simulations of Passive Photonic Integrated Circuits. *Journal of Lightwave Technology*. 2022. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3213389>
12. Барило Г. І., Голяка Р. Л., Брич П. В., Павленко М. В., Онутчак Т. А. Моделювання сигнального перетворювача фотодіодних сенсорних пристроїв *Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*. 2025. Вип. 5, № 1. С. 145–153. <https://doi.org/10.23939/ictee2025.01.145>

Barylo N.H., Brych M.V., Pryshliak S.O., Brych P.V., Akopian V.H., Varkiv D.V. MODELING OF SPECTRAL PHOTOSENSORS USING MULTIPLICATIVE–INTEGRAL TRANSFORMATIONS

This paper presents an approach to modeling spectral photosensors based on a multiplicative–integral transformation of spectral characteristics. The motivation for this study arises from the increasing use of spectral photodetectors in modern optoelectronic and sensor systems, where measurement accuracy, stability, and robustness under varying operating conditions are of critical importance. Traditional modeling techniques often focus on discrete spectral features or local signal values, which limits their ability to comprehensively describe the interaction between optical and electronic components.

The proposed approach considers the formation of the informative signal as the result of spectral interaction between the radiation source, the optical medium, and the photosensitive element. A multiplicative–integral model is formulated to describe this interaction, allowing the integral photocurrent to be interpreted as a generalized informative parameter that reflects the spectral overlap of all system components within a given wavelength range.

To enable practical analysis and simulation, the spectral characteristics of individual elements are represented in a parametric analytical form. This representation facilitates numerical evaluation of the model and provides a clear link between graphical spectral data and their mathematical description. The model emphasizes the role of integral spectral behavior rather than instantaneous signal values, which improves robustness against noise, background illumination, and other destabilizing factors.

A SPICE-oriented implementation of the proposed model is developed to demonstrate its applicability in circuit-level simulation environments. The spectral components are mapped onto functional blocks using controlled sources, while the integral nature of the photocurrent is realized through equivalent electrical integration. Simulation results illustrate the sensitivity of the integral signal to variations in spectral parameters, such as shifts of spectral maxima and changes in bandwidth, as well as to destabilizing effects associated with parameter drift and degradation.

The obtained results confirm that the proposed modeling approach provides a unified framework for combining spectral and electronic aspects of photosensor operation. This framework can be effectively used for the analysis, optimization, and stability assessment of spectral photosensors, and it creates a foundation for further development of advanced optoelectronic sensing systems with enhanced reliability and diagnostic capabilities.

Keywords: *spectral photosensor; photodiode sensor; multiplicative–integral model, SPICE simulation, optoelectronic systems.*

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026