

УДК 532.783

Р. Л. ГОЛЯКА, Т. В. ПРИСТАЙ, В. С. ПЕТРИШАК

ЕКСПРЕС-АНАЛІЗ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЧУТЛИВОСТІ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ НА ОСНОВІ ФУНКЦІЙ ГАУСА

*Львівська політехніка,**79013, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна**E-mail: zmykytyuk@polinet.lviv.ua, tel: +38-032-2582162*

Анотація. У роботі розглядається методика експрес-аналізу спектральної чутливості оптоелектронних сенсорів на триканальних RGB сигнальних перетворювачах. Для апроксимації спектральних характеристик світлодіодів, фотодіодів і активного середовища сенсора використано функції Гауса.

Ключові слова: експрес-аналіз, спектральні характеристики, апроксимація, холестеринні рідкі кристали.

Аннотация. В работе рассматривается методика экспресс-анализа спектральной чувствительности оптоэлектронных сенсоров на трехканальных RGB сигнальных преобразователях. Для аппроксимации спектральных характеристик светодиодов, фотодиодов и активной среды сенсора использовано функции Гаусса.

Ключевые слова: экспресс-анализ, спектральные характеристики, аппроксимация, холестеринные жидкие кристаллы.

Abstract. In paper the express-analysis technique of spectral sensitivity of optoelectronic sensors for three-channel RGB signal converters is described. The Gaussian functions to approximate the spectral characteristics of light diodes, photodiodes and active environment sensor are proposed.

Keywords: rapid analysis, spectral characteristics, approximation, cholesteric liquid crystals.

ВСТУП

Важливою складовою процесу розроблення сучасних мікроелектронних сенсорних пристроїв є вибір та оптимізація схем сигнальних перетворювачів [1]. Залежно від типу сенсорних пристроїв та їхніх параметрів вирішуються різноманітні задачі підвищення чутливості, стабільності та завадостійкості сигнального перетворення [2, 3].

Ця робота присвячена проблемі сигнального перетворення оптоелектронних сенсорів, які застосовуються, зокрема, для дослідження хімічного складу газів, рідин, хімічних та біохімічних сполук. Інформативний сигнал таких оптоелектронних сенсорів обумовлюється селективним поглинанням або відбиванням оптичного випромінювання від досліджуваної речовини. Спектральна характеристика вимірюється оптопарами, які складається з керованих джерел оптичного випромінювання та фоточутливих елементів. Джерелом опромінювання можуть бути світлодіод, група світлодіодів зі зміщеними спектральними характеристиками, лазери, фотолюмінісцентні випромінювачі тощо, а фоточутливими елементами — фотодіоди, фототранзистори та фотоматриці на їх основі [4].

Прикладами сучасних оптоелектронних сенсорів є газові сенсори на наноструктурованих матеріалах [5, 6], біомедичні імплантаційні сенсори [7], рефракційні сенсори на ефекті поверхневого плазмонного резонансу [8], телеметричні сенсори [9] тощо.

Для вимірювання спектра досліджуваного середовища в оптоелектронних сенсорах широко використовуються колірні RGB сигнальні перетворювачі [10, 11].

СХЕМИ ТА СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ RGB СЕНСОРІВ

Алгоритми функціонування колірних RGB сигнальних перетворювачів оптоелектронних сенсорів можуть базуватися на двох структурних схемах. У першій використовуються три світловипромінювальні елементи, зокрема світлодіоди — LED_R (червоний), LED_G (зелений), LED_B (синій) та спільний фоточутливий елемент, наприклад, фотодіод PHD (рис. 1a). Такі світловипромінювальні елементи можуть інтегруватися в єдиний корпус, як показано на прикладі RGB світлодіодів VLMRGB343 компанії Vishay Semiconductors (рис. 2a) [12]. У другій схемі, навпаки,

використовують один спільний світловипромінювальний елемент, наприклад, світлодіод LED і три фоточутливі елементи, зокрема фотодіоди з селективною спектральною характеристикою — PHD_R , PHD_G та PHD_B (рис. 1б) Така селективна спектральна характеристика забезпечується відповідними RGB оптичними фільтрами.

У якості активного середовища M первинного перетворювача оптичних сенсорів використовуються холестеричні рідкі кристали або полімер-дисперговані рідкокристалічні матеріали, які мають селективне відбивання у видимій області, доповані нанорозмірними домішками Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , нанотрубками AlN , вуглецевими нанотрубками тощо [13—16].

Керування режимами роботи світлодіодів здійснюється драйвером LED Driver, а сигнал фотодіода (фотострум) перетворюється, підсилюється та оцифровується за допомогою сигнального конвертера Signal Converter. Інформативний сигнал являє собою три послідовно отримані RGB складові — S_R , S_G та S_B , за співвідношенням між якими визначають спектральну характеристику активного середовища M , а відтак, кількісний чи якісний склад досліджуваного газу чи рідини.

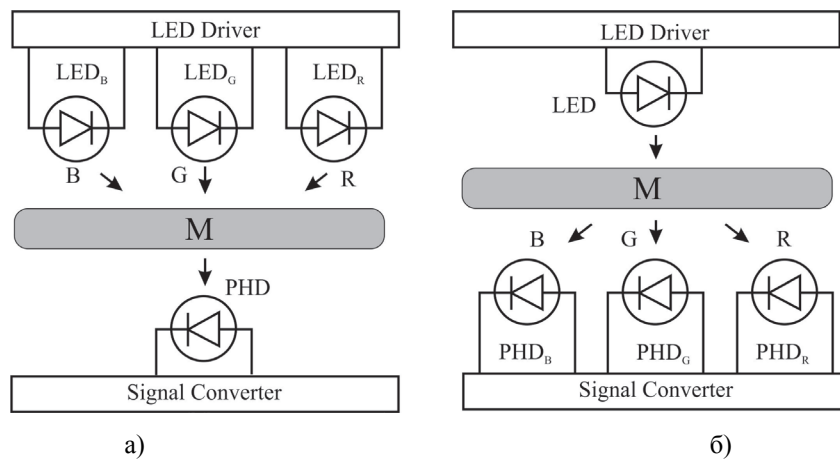


Рис. 1. Структурні схеми сигнальних перетворювачів оптоелектронних сенсорів з RGB світлодіодами (а) та RGB фотодіодами (б)

Використання першої з наведених структурних схем із трьома світлодіодами LED_R , LED_G та LED_B має перевагу з погляду вищої селективності, що зумовлено значно вузькими смугами випромінювання світлодіодів порівняно зі смугами пропускання оптичних фільтрів фотоприймачів. Приклад типових спектральних характеристик інтегрованого модуля RGB світлодіодів VLMRGB343 наведено на рис. 2б, де λ — довжина хвилі (нм), I_V — інтенсивність свічення (відносні одиниці) [12]. Видно, що в першому наближенні спектральні характеристики таких світлодіодів описуються функцією Гауса.

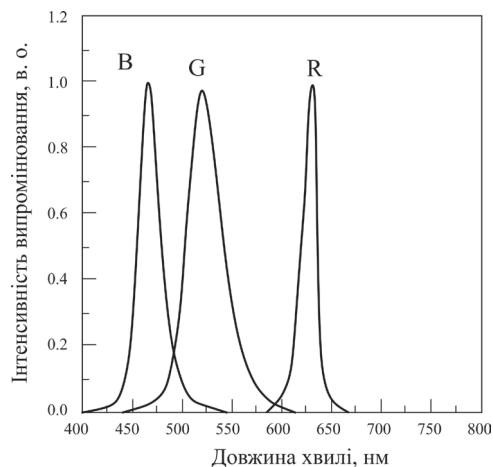


Рис. 2. Спектральні характеристики інтегрованого модуля RGB світлодіодів VLMRGB343 Vishay [12]

Розглянемо спектральні характеристики активних середовищ М на основі холестеричних рідких кристалів, допованих нанодомішками Fe_3O_4 [13] та Fe_2O_3 [14]. На рис. 3 наведена спектральна характеристика ХПК CLC 2103L (а) та модифікованого нанодомішками Fe_3O_4 за різних концентрацій монооксиду вуглецю, який взаємодіє з активним середовищем. На спектральній характеристиці ХПК 2103L спостерігаємо інтенсивну смугу поглинання на довжині хвилі 597 нм при кімнатній температурі. Модифікація ХПК магнетитом Fe_3O_4 призводить до зміщення мінімуму пропускання в короткохвильову область. При цьому величина зсуву зростає зі збільшенням концентрації магнетиту.

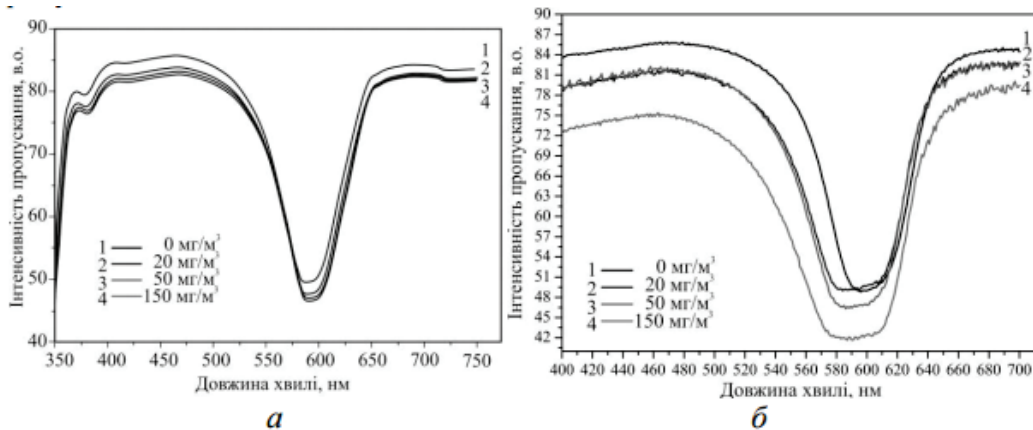


Рис. 3. Спектри пропускання не модифікованого ХПК CLC-2103L (а) та ХПК CLC-2103L, модифікованого Fe_3O_4 (б), для різних концентрацій монооксиду вуглецю : 1 — 0 мг/м^3 ; 2 — 20 мг/м^3 ; 3 — 50 мг/м^3 ; 4 — 150 мг/м^3 [13]

На рис. 4 показано спектри пропускання активного середовища на основі ХПК EE1 (а) та ХПК EE1, модифікованого Fe_2O_3 (б), під час його взаємодії з монооксидом вуглецю. Аналіз спектрів показує, що зі збільшенням концентрації монооксиду вуглецю спостерігається зсув мінімуму пропускання та зміна форми спектральної характеристики та її півширини. Внаслідок активних адсорбційних властивостей нанорозмірних частинок Fe_2O_3 та Fe_3O_4 відбувається поглинання молекул газів та утворення стабільних координаційних зв'язків з поверхнею нанорозмірної частинки і, як наслідок, зміна характеру взаємодії наночастинки з молекулами ХПК. Наведені спектральні характеристики активних середовищ на основі ХПК, допованих нанорозмірними домішками, в першому наближенні можна описати функціями Гауса.

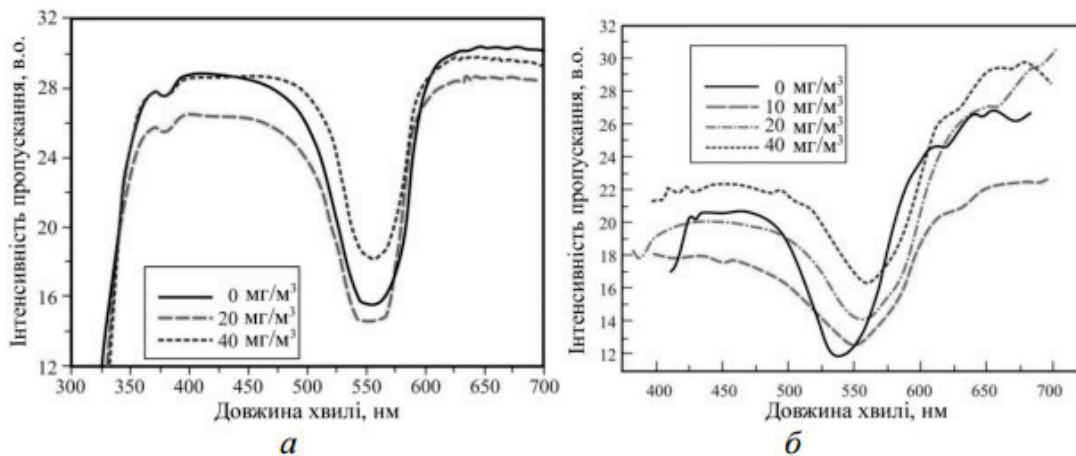


Рис. 4. Спектри пропускання не модифікованого ХПК EE1 (а) та ХПК CLC-2103L, модифікованого Fe_3O_4 (б), для різної концентрації монооксиду вуглецю [14]

Метою наведеного далі експрес-аналізу є встановлення закономірностей, на основі яких можна оптимізувати спектральну характеристику активного середовища, зокрема довжину хвилі λ_M з максимальним поглинанням цього середовища. Оптимізація проводиться за критерієм максимальної чутливості оптоелектронного сенсора на основі RGB світлодіодів. Для проведення такого експрес-

аналізу використаємо модельні дослідження з апроксимацією спектральних характеристик математичними функціями, зокрема функціями Гауса.

АПРОКСИМАЦІЯ ФУНКЦІЯМИ ГАУСА

Спектральні характеристики оптопар та активного середовища оптоелектронних сенсорів у першому наближенні можна зобразити у вигляді функції Гауса

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}},$$

де a , b , c — константи, $e \approx 2,718$ — число Ейлера.

Для більшої наочності константи цієї функції можна замінити відповідними параметрами функції нормального розподілу, зокрема медіанного значення та середньоквадратичного відхилення. Відтак, залежності інтенсивності випромінювання R , G та B світлодіодів від довжин хвиль оптичного випромінювання λ зобразимо у вигляді функцій:

$$f_R(\lambda) = A_R e^{-\frac{(\lambda-\lambda_{RM})^2}{2\sigma_R^2}}, \quad A_R = \frac{K_R}{\sigma_R \sqrt{2\pi}} \text{ (світлодіод R),}$$

$$f_G(\lambda) = A_G e^{-\frac{(\lambda-\lambda_{GM})^2}{2\sigma_G^2}}, \quad A_G = \frac{K_G}{\sigma_G \sqrt{2\pi}} \text{ (світлодіод G),}$$

$$f_B(\lambda) = A_B e^{-\frac{(\lambda-\lambda_{BM})^2}{2\sigma_B^2}}, \quad A_B = \frac{K_B}{\sigma_B \sqrt{2\pi}} \text{ (світлодіод B),}$$

де λ_{RM} , λ_{GM} , λ_{BM} — довжини хвиль з максимумом випромінювання, σ_R , σ_G , σ_B — значення середньоквадратичних відхилень, що визначають відповідні ширини смуг випромінювання, K_R , K_G , K_B — лінійні коефіцієнти інтенсивності випромінювання.

Аналогічно, спектральну характеристику фотоелементу запишемо як:

$$f_P(\lambda) = A_P e^{-\frac{(\lambda-\lambda_{PM})^2}{2\sigma_P^2}}, \quad A_P = \frac{K_P}{\sigma_P \sqrt{2\pi}},$$

де λ_{PM} — довжина хвилі з максимальною фото чутливістю; σ_P — значення середньоквадратичного відхилення, що визначає ширину смуги фото чутливості; K_P — лінійний коефіцієнт fotocутливості.

Враховуючи базове зміщення та від'ємний знак, функцію поглинання активного середовища M запишемо як:

$$f_M(\lambda) = 1 - A_M e^{-\frac{(\lambda-\lambda_M)^2}{2\sigma_M^2}}, \quad A_M = \frac{K_M}{\sigma_M \sqrt{2\pi}},$$

де λ_M — довжина хвилі з максимальним поглинанням; σ_P — значення середньоквадратичного відхилення, що визначає ширину смуги поглинання; K_P — лінійний коефіцієнт поглинання.

Три складові S_R , S_G , S_B інформативного сигналу сигнального перетворювача оптоелектронного сенсора описуються визначеними інтегралами з граничними значеннями мінімальної λ_{MIN} та максимальної λ_{MAX} довжин хвиль:

$$S_R = \int_{\lambda_{MIN}}^{\lambda_{MAX}} f_{RS}(\lambda) d\lambda, \quad \text{де } f_{RS}(\lambda) = f_R(\lambda) \cdot f_P(\lambda) \cdot f_M(\lambda),$$

$$S_G = \int_{\lambda_{MIN}}^{\lambda_{MAX}} f_{GS}(\lambda) d\lambda, \quad \text{де } f_{GS}(\lambda) = f_G(\lambda) \cdot f_P(\lambda) \cdot f_M(\lambda),$$

$$S_B = \int_{\lambda_{MIN}}^{\lambda_{MAX}} f_{BS}(\lambda) d\lambda, \quad \text{де } f_{BS}(\lambda) = f_B(\lambda) \cdot f_P(\lambda) \cdot f_M(\lambda).$$

Приклад нормованих спектральних характеристик M і складових інформативного сигналу S оптоелектронного сенсора, отриманих апроксимацією вищенаведених функцій Гауса, наведено на рис. 5. Проаналізуємо на цьому прикладі спектральну чутливість сигнального перетворювача сенсора, враховуючи зміщення функції поглинання $f_M(\lambda)$ активного середовища M .

Крім того, для подальшого аналізу використаємо нормований сумарний сигнал, який визначимо у вигляді середнього значення трьох складових S_R, S_G, S_B :

$$S_N = \frac{S_R + S_G + S_B}{3}.$$

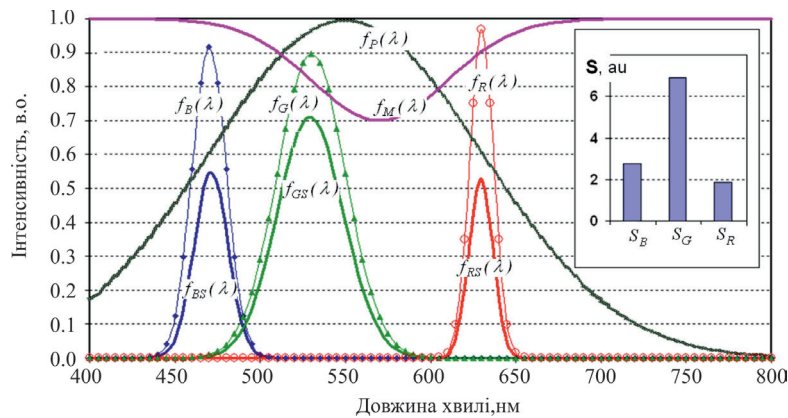


Рис. 5. Нормовані спектральні характеристики активного середовища M і складових інформативного сигналу S оптоелектронного сенсора

ЕКСПРЕС-АНАЛІЗ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЧУТЛИВОСТІ

Розглянемо основні підходи та результати експрес-аналізу спектральної чутливості оптоелектронного сенсора на основі кольорового сигнального перетворювача, зокрема з використанням вищерозглянутого інтегрованого модуля RGB світлодіодів. Метою такого експрес-аналізу є визначення закономірностей, які характеризують залежності чутливості сенсора від обумовленої впливом досліджуваної речовини зміни спектральної характеристики активного середовища M . Чутливість визначимо за модуляцією складових інформативного сигналу S_R, S_G, S_B та їх різниць. У першому наближенні таку модуляцію охарактеризуємо зміщенням довжини хвилі з максимальним поглинанням λ_M .

В основу аналізу покладемо результати модельних досліджень з використанням апроксимації вищезгаданими функціями Гауса. Залежність складових інформаційного сигналу та їхніх різниць в процесі поглинання випромінювання активним середовищем в діапазоні від 400 нм до 750 нм наведено на рис. 6 та рис. 7.

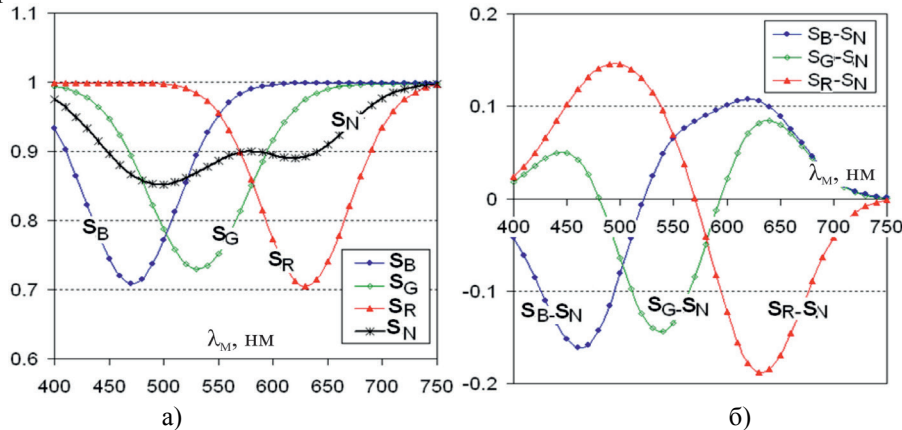


Рис. 6. Залежності складових інформативного сигналу S_R, S_G, S_B, S_N (а) та їхніх різниць $S_R-S_N, S_G-S_N, S_B-S_N$ (б) від λ_M

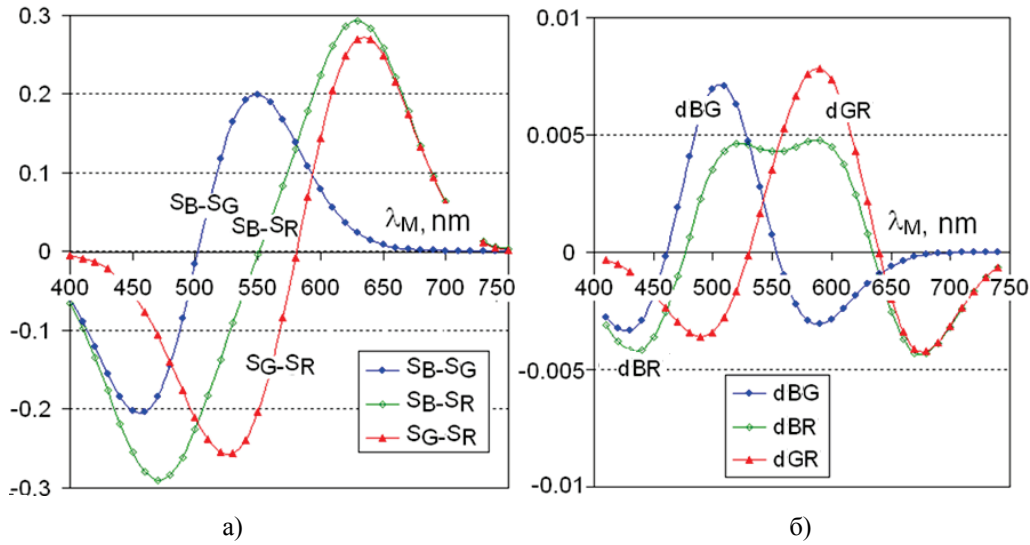


Рис. 7. Залежності різницевих сигналів S_B-S_G , S_B-S_R , S_G-S_R (а) та їхніх похідних

Мінімум функцій S_R , S_G , S_B (рис. 5а) спостерігається при накладанні довжини хвилі λ_M максимального поглинання активного середовища на довжини хвиль λ_{RM} , λ_{GM} , λ_{BM} максимуму випромінювання світлодіодів. Для функції нормованого сумарного сигналу S_N характерною є наявність двох екстремумів з мінімумами між довжинами хвиль λ_{RM} , λ_{GM} , λ_{BM} .

Зазначимо, що на практиці модуляція довжини хвилі λ_M незначна і, в залежності від чутливості активного середовища М і концентрації досліджуваної речовини, перебуває в межах від одиниць до декількох десятків нанометрів. Отже, аналіз вищенаведених залежностей доцільно проводити не в усьому діапазоні λ_M , а на окремих його ділянках $\lambda_{M0} + \Delta\lambda$, де λ_{M0} — початкова довжина хвилі максимального поглинання, $\Delta\lambda$ — модуляція спектра активного середовища під дією досліджуваної речовини.

Так, якщо $\lambda_{M0} \approx 500$ нм, $\Delta\lambda = 0 \dots 20$ нм, дослідження проводять на ділянці спектра від 500 нм до 520 нм. Видно, що на цій ділянці спостерігається різна направленість складових інформативного сигналу — зі збільшенням λ_M складова S_R спадає, а складові S_G та S_B зростають. Така різнонапрявлена зміна складових є важливою з погляду забезпечення високої завадостійкості сигнального перетворювача. До того ж, як це показано, залежності S_R та S_G мають високу інформативність, тобто характеризується високою крутизною та квазілінійністю функції перетворення. Натомість, складова S_B наближається до граничного значення (якщо сигнали подано в нормованому вигляді — до одиниці), що в цьому конкретному прикладі робить використання цієї складової малоефективним. Важливим результатом такого експрес-аналізу є встановлена квазістабільність сумарного сигналу S_N з максимальною стабільністю при $\lambda_M \approx 550$ нм. Цей результат демонструє можливість використання сумарного сигналу S_N як опорної величини, яка при модуляції спектральної характеристики активного середовища залишається квазістабільною.

$$dBG = \frac{d(S_B - S_G)}{d\lambda_M}, dBR = \frac{d(S_B - S_R)}{d\lambda_M}, dGR = \frac{d(S_G - S_R)}{d\lambda_M} \text{ від } \lambda_M$$

Подальший алгоритм формування інформативного сигналу може передбачати використання різниць між складовими S_R , S_G , S_B та їхнім сумарним значенням S_N , тобто, S_R-S_N , S_G-S_N , S_B-S_N (рис. 5, б), або різниць між окремими складовими, зокрема S_B-S_G , S_B-S_R , S_G-S_R (рис. 6, а). Видно, що ефективність використання таких різниць значною мірою залежить від ділянки спектра. Відтак, залежно від спектральної характеристики активного середовища, вибирають найбільш оптимальний набір сигналів та їхніх різниць. Крім того, під час аналізу крутизни та лінійності функцій перетворення доцільно розглянути спектральну залежність похідних різниць складових сигналу, зокрема, як це показано на

рис. 6, б, де: $dBG = \frac{d(S_B - S_G)}{d\lambda_M}$, $dBR = \frac{d(S_B - S_R)}{d\lambda_M}$, $dGR = \frac{d(S_G - S_R)}{d\lambda_M}$.

ВИСНОВОК

Запропоновано методику експрес-аналізу спектральної чутливості оптоелектронних сенсорів на триканальних RGB сигнальних перетворювачах. Метою експрес-аналізу є встановлення закономірностей, на основі яких можна досягти максимальної чутливості оптоелектронного сенсора на основі RGB світлодіодів. Для проведення експрес-аналізу використано модельні дослідження з апроксимацією спектральних характеристик функціями Гауса. Показано приклад використання запропонованої методики в оптоелектронному сенсорі на основі інтегрованого модуля RGB світлодіодів VLMRGB343.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. J. Fraden. Handbook of modern sensors: Physics, design, and applications. Fourth Edition / Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2010. — 663 p. — ISBN 978-1-4419-6465-6.
2. Signal transducers of capacitive microelectronic sensors / Z. Hotra, R. Holyaka, T. Marusenkova, J. Potencki. // Elektronika. Rzeszow. Poland. — 2010. — № 8. — P. 129—132.
3. Завадостійкий сигнальний перетворювач на базі синхронного детектора / Готра З. Ю., Голяка Р. Л., Готра О. З., Гельжинський І. І., Марусенкова Т. А. // Вимірювальна техніка та метрологія. — 2010. — № 71. — С. 110—117.
4. Fritz Schuermeyer. Photometry and Radiometry. CRC Press LLC. — 2000. — P. 39. Електронний ресурс: <http://www.engnetbase.com>.
5. Nitrogen Oxide (NO₂) Gas Sensing Performance of ZnO Nanoparticles (NPs) Sapphire-Based Sensors / Po-Cheng Chou; Huey-Ing Chen; I-Ping Liu. // IEEE Sensors Journal. — 2015. — Vol. 15, I. 7. — P. 3759—3763.
6. Prystay T. Nanocomposite based on a liquid crystal doped with aluminum nitride nanotubes for optical sensor of sulfur dioxide / T. Prystay, Z. Mykytyuk, O. Sushynskiy, A. Fechan // Journal of the SID. — 2015. — Vol. 23/9. — P. 132—138.
7. Implantable optical sensor for continuous monitoring of various hemoglobin derivatives and tissue perfusion / J. Fiala, R. Gehrke, N. Weber, P. Bingger, H. Zappe, A. Seifert. // Sensors IEEE Conference. — 2009. — P. 1971—1974.
8. Spreeta-R TSPR2KXY-R. Refractive Index Sensor. Product Bulletin. Texas Instruments Inc. — 2003. — P. 2. Електронний ресурс: www.spreeta.com.
9. Photodiode-Based Low-Cost Telemetric Lidar for the Continuous Monitoring of Urban Particulate Matter / M.D. Guasta, M. Baldi, F. Castagnoli. A // Photodiodes — Communications, Bio-Sensings, Measurements and High-Energy Physics. Edited by Jin-Wei Shi. — 2011. — 284 p.
10. Color-Shift Keying and Code-Division Multiple-Access Transmission for RGB-LED Visible Light Communications Using Mobile Phone Camera / Shih-Hao Chen and Chi-Wai Chow // IEEE Photonics Journal. — 2014. — Vol. 6, N. 6. — P. 1—7.
11. Development of a New High-Resolution Angle-Sensing Mechanism Using an RGB Sensor / Young-shin Kwon; Won-Jong Kim. // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. — 2014. — Vol. 19, No. 5. — P. 1707—1715.
12. Multi SMD LED RGB VLMRGB343 // vlmrgb34.pdf. Електронний ресурс: www.vishay.com.
13. Cholesteric liquid crystal doped nanosized magnetite as active medium of optical gas sensor / O. Aksimentyeva, Z. Mykytyuk, A. Fechan, B. Tsizh, O. Sushynskiy // Molecular Crystals and Liquid Crystals. — 2014. — Vol. 589. — P. 83—89.
14. Оптоелектронний сенсор монооксиду вуглецю на основі холестеричного рідкого кристала легованого магнетитом Fe₂O₃ / Готра З. Ю., Вісьтак М. В., Микитюк З. М., Сушинський О. Є., Пристай Т. В. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2013. — № 1 (25). — С. 94—99.
15. Полімер-диспергований рідкокристалічний матеріал як активне середовище первинного перетворювача оптичного сенсора температури / Готра З. О., Фечан А. В., Барило Г. І., Бойко О. В., Вісьтак М. В., Сушинський О. Є., Чабан О. В., Пристай Т. В. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2013. — № 2 (26). — С. 131—135.
16. Чутливий елемент оптичного сенсора діоксиду сірки / Пристай Т. В., Микитюк З. М., Фечан А. В. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2015. — № 1 (29). — С. 150—154.

SPISOK LITERATURI

1. J. Fraden. Handbook of modern sensors: Physics, design, and applications. Fourth Edition / Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2010. — 663 p. — ISBN 978-1-4419-6465-6.
2. Signal transducers of capacitive microelectronic sensors / Z. Gotra, R. Holyaka, T. Marusenkova, J. Potencki. // Elektronika. Rzeszow. Poland. — 2010. — № 8. — P. 129—132.
3. Zavadostiykiy signalniy peretvoryuvach na bazi sinhronnogo detektora / Gotra Z. Yu., Golyaka R. L., Gotra O. Z., Gelzhinskiy I. I., Marusenkova T. A. // Vimiryuvalna tehnika ta metrologiya. — 2010. — № 71. — S. 110—117.
4. Fritz Schuermeyer. Photometry and Radiometry. CRC Press LLC. — 2000. — P. 39. Електронний ресурс: <http://www.engnetbase.com>.
5. Nitrogen Oxide (NO₂) Gas Sensing Performance of ZnO Nanoparticles (NPs) Sapphire-Based Sensors / Po-Cheng Chou; Huey-Ing Chen; I-Ping Liu. // IEEE Sensors Journal. — 2015. — Vol. 15, I. 7. — P. 3759—3763.
6. Prystay T. Nanocomposite based on a liquid crystal doped with aluminum nitride nanotubes for optical sensor of sulfur dioxide / T. Prystay, Z. Mykytyuk, O. Sushynskiy, A. Fechan // Journal of the SID. — 2015. — Vol. 23/9. — P. 132—138.
7. Implantable optical sensor for continuous monitoring of various hemoglobin derivatives and tissue perfusion / J. Fiala, R. Gehrke, N. Weber, P. Bingger, H. Zappe, A. Seifert. // Sensors IEEE Conference. — 2009. — P. 1971—1974.
8. Spreeta-R TSPR2KXY-R. Refractive Index Sensor. Product Bulletin. Texas Instruments Inc. — 2003. — P. 2. Електронний ресурс: www.spreeta.com.
9. Photodiode-Based Low-Cost Telemetric Lidar for the Continuous Monitoring of Urban Particulate Matter / M. D. Guasta, M. Baldi, F. Castagnoli. A // Photodiodes — Communications, Bio-Sensings, Measurements and High-Energy Physics. Edited by Jin-Wei Shi. — 2011. — 284 p.
10. Color-Shift Keying and Code-Division Multiple-Access Transmission for RGB-LED Visible Light Communications Using Mobile Phone Camera / Shih-Hao Chen and Chi-Wai Chow // IEEE Photonics Journal. — 2014. — Vol. 6, N. 6. — P. 1—7.
11. Development of a New High-Resolution Angle-Sensing Mechanism Using an RGB Sensor / Young-shin Kwon; Won-Jong Kim. // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. — 2014. — Vol. 19, No. 5. — P. 1707—1715.
12. Multi SMD LED RGB VLMRGB343 // vlmrgb34.pdf. Електронний ресурс: www.vishay.com.
13. Cholesteric liquid crystal doped nanosized magnetite as active medium of optical gas sensor / O. Aksimentyeva, Z. Mykytyuk, A. Fechan, B. Tsizh, O. Sushynskiy // Molecular Crystals and Liquid Crystals. — 2014. — Vol. 589. — P. 83-89.
14. Optoelektronniy sensor monooksidu vugletsyu na osnovi holesterichnogo ridkogo kristala legovanogo magnetitom Fe₂O₃ / Gotra Z. Yu., Vistak M. V., Mikityuk Z. M., Sushynskiy O. E., Prystay T. V. // Optiko-elektronni nformatsiyno-energetichni tehnologiyi. — 2013. — № 1 (25). — S. 94—99.
15. Polimer-dispergovaniy ridkokristalichniy material yak aktivne seredovishe pervinnogo peretvoryuvacha optichnogo sensora temperaturi / Gotra Z. O., Fechan A. V., Barilo G. I., Boyko O. V., Vistak M. V., Sushynskiy O. E., Chaban O. V., Prystay T. V. // Optiko-elektronni nformatsiyno-energetichni tehnologiyi. — 2013. — № 2 (26). — S. 131—135.
16. Chutliviy element optichnogo sensora dioksidu sirki / Prystay T. V., Mikityuk Z. M., Fechan A. V. // Optiko-elektronni nformatsiyno-energetichni tehnologiyi. — 2015. — № 1 (29). — S. 150—154.

Надійшла до редакції 29.12.2015 р.

ГОЛЯКА РОМАН ЛЮБОМИРОВИЧ — доктор технічних наук, професор кафедри електронних приладів, Національний університет «Львівська політехніка». м. Львів, Україна.

ПРИСТАЙ ТАРАС ВІТАЛІЙОВИЧ — аспірант кафедри електронних приладів, Національний університет «Львівська політехніка». м. Львів, Україна.

ПЕТРИШАК ВАСИЛЬ СТЕПАНОВИЧ — аспірант кафедри електронних приладів, Національний університет «Львівська політехніка». м. Львів, Україна.