

УДК 681.7: 616-71

Н.І. ЗАБОЛОТНА, О.С. ШВИДЮК

СИСТЕМА ТА МЕТОД ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ ОПТИЧНИХ КОМПОНЕНТІВ НА ОСНОВІ МЮЛЛЕР-МАТРИЧНОГО ПІДХОДУ

*Вінницький національний технічний університет,
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, e-mail: Natalia.zabolotna@gmail.com*

Анотація. В статті розроблено метод калібрування оптичних компонентів на основі визначення та статистичного аналізу двовимірних розподілів похибок вимірювання матриць Мюллера, доповнений бінарною класифікацією. Наведено відповідну архітектуру системи Мюллер-матричного поляриметричного калібрування оптичних компонентів з блоком класифікаційного аналізу на основі порогового оброблення.

Ключові слова: калібрування оптичних компонентів, матриця Мюллера, поляриметрична система, похибки вимірювання, статистичний аналіз, бінарна класифікація.

Abstract. The article develops a method for calibrating optical components based on the determination and statistical analysis of two-dimensional distributions of measurement errors of Muller matrices, supplemented by binary classification. The corresponding architecture of the Muller matrix polarimetric calibration system of optical components with a classification analysis block based on threshold processing is presented.

Key words: calibration of optical components, Muller matrix, polarimetric system, measurement errors, statistical analysis, binary classification.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-50-2-293-299

ВСТУП

Для забезпечення коректної роботи оптичних компонентів у складі інформаційно-вимірювальних поляриметричних комплексів, що застосовуються, зокрема, у технічних і медичних діагностичних системах, необхідно проводити їх точне калібрування. Суть такого калібрування полягає у експериментальному вимірюванні поляризаційних параметрів досліджуваних елементів та подальшому зіставленні їх із відомими еталонними значеннями. На основі цього порівняння визначають і компенсують систематичні похибки, коригуючи реальні поляризаційні характеристики відповідними поправочними коефіцієнтами.

До головних джерел систематичних похибок належать неточності при встановленні оптичних компонентів у системі, нестабільність випромінювача та оптичного сенсора, неоднорідність оптичних властивостей зразка по апертурі та інші чинники.

В основу поляриметричного способу калібрування схемотехнічного оптичного компонента можна покласти мюллер-матричну модель [1, 2]. Модель описує в термінах вектора Стокса трансформацію параметрів лазерного пучка, що взаємодіє з оптичним компонентом, математичним еквівалентом оптико-анізотропних властивостей якого є матриця Мюллера. Як опорні використовують відомі поляризаційні стани (0°, 45°, 90°, циркулярні) та стандартні зразки з заданими матрицями Мюллера або ідеальні поляризатори й компенсатори [3, 4].

Більшість існуючих підходів ґрунтуються на інтегральному оцінюванні похибок. Хоча різні елементи вектора Стокса та матриці Мюллера, отримані експериментально в межах одного двовимірного поля, можуть визначатися з неоднаковими похибками. Таке нерівномірне розподілення невизначеності безпосередньо впливає на точність реконструкції характеристик оптичної анізотропії.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Отже, важливим завданням є врахування просторової специфіки оптико-анізотропних параметрів об'єкта в кожній окремій точці його площини під час оцінювання похибок у поляриметричних калібрувальних системах [5, 6]. Це дозволить підвищити точність та достовірність отримуваних результатів.

Разом із тим, високі вимоги до функціональних можливостей систем калібрування вимагають застосування сучасних методів обробки та аналізу координатних розподілів похибок.

Метою роботи є розширення функціональних можливостей методу поляриметричного калібрування оптичних компонентів шляхом вимірювання та класифікаційного аналізу двовимірних розподілів похибок повного набору їхніх мюллер-матричних зображень (ММЗ) в системі мюллер-матричного картографування [8,9].

АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ МЮЛЛЕР-МАТРИЧНОГО ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ ОПТИЧНИХ КОМПОНЕНТІВ

Відомо, що оптико-анізотропні властивості (орієнтація оптичної осі, фазовий зсув або показник двопронезаломлення) таких оптичних схемотехнічних компонентів як оптичні поляризатори та фазозсувні платівки, описують за допомогою елементів матриці Мюллера.

Для коректного калібрування заданого положення, зокрема фазової пластинки у поляриметричній схемі, необхідно відстежувати як величину її фазового зсуву, так і орієнтацію швидкої осі. З цією метою проводять вимірювання матриці Мюллера реальної фазової пластинки, що досліджується в складі лазерного поляриметра, схема якого наведена на рисунку 1, та зіставляють отримані дані з матрицею Мюллера ідеальної фазової пластинки.

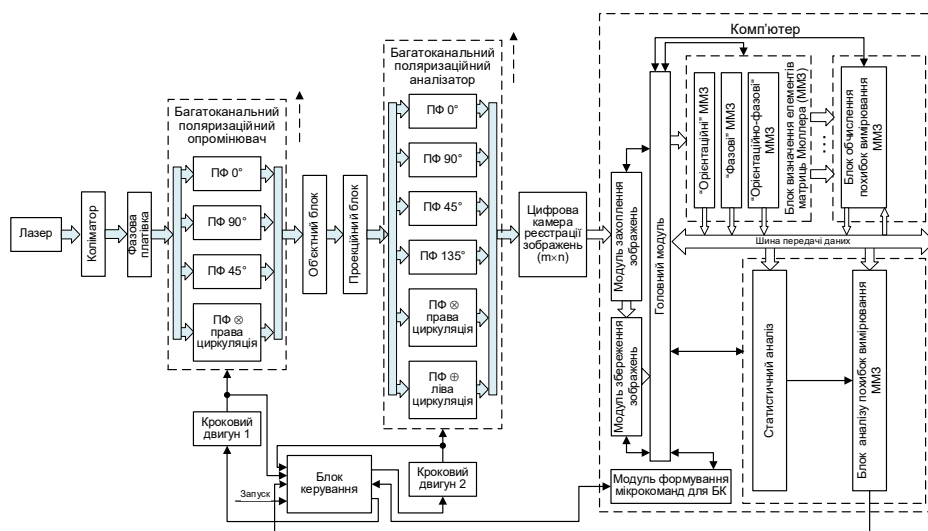


Рисунок 1 – Архітектура системи Мюллер-матричного поляриметричного калібрування оптичних компонентів

Архітектура вищенаведеної системи є традиційною з точки зору номенклатури базових блоків та взаємозв'язків між ними в процесі організації вимірювань «орієнтаційних», «орієнтаційно-фазових» та «фазових» розподілів елементів мюллер-матричних зображень (ММЗ) об'єкту калібрування [3–6].

Лазер, що є джерелом випромінювання, може працювати на одній із довжин хвиль 0,638 мкм чи 0,405 мкм. Використані в схемі оптичні елементи також повинні працювати у вказаному діапазоні довжин хвиль. Характеристики поляризації лазерного пучка, яким зондують об'єкт калібрування, розташований в об'єктному блоці, задають, обираючи по черзі один із поляризаційних фільтрів $a = ПФ0^\circ, ПФ90^\circ, ПФ45^\circ, ПФ\otimes$ в багатоканалному поляризаційному опромінювачі. За допомогою одного із 6 поляризаційних фільтрів $b = ПФ0^\circ, ПФ90^\circ, ПФ45^\circ, ПФ135^\circ, ПФ\otimes, ПФ\oplus$

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

багатоканального поляризаційного аналізатора отримують відповідний розподіл інтенсивності зображення, що відфільтрована за параметрами поляризації $I(a, b)$.

На основі вимірювань 24 розподілів поляризаційно перетворених інтенсивностей $I(a, b)$, зафіксованих камерою і збережених в комп'ютері, за феноменологічним методом визначають 16 розподілів ММЗ [3].

Удосконалений метод поляриметричного калібрування оптичних схемотехнічних компонентів на основі Мюллер-матричного підходу полягає в наступному.

1. Визначаємо за феноменологічним методом 16 двовимірних розподілів $M_{ij}^{\text{exp}}(N \times N)$ елементів ММЗ об'єкта калібрування.
2. Обчислюємо відповідні 16 двовимірних розподілів $M_{ij}^{\text{sim}}(N \times N)$ еталонної матриці Мюллера об'єкта.
3. Для кожного вимірюваного елемента ММЗ об'єкта калібрування формуємо набір із 16 матриць похибок $\Delta M_{ij}(N \times N)$, зіставляючи його зі значенням еталону:

$$\Delta M_{ij}(N \times N) = \left| M_{ij}^{\text{exp}}(N \times N) - M_{ij}^{\text{sim}}(N \times N) \right|. \quad (2)$$

4. Аналізуємо розподілів матриць похибок на основі статистичного підходу, визначаючи їх статистичні моменти 1–4 порядків [3, 7] у вигляді величин, позначених як A, B, C, D .
5. На основі аналізу отриманих статистичних характеристик $\{A, B, C, D\}$ формуємо автоматизований висновок щодо того, наскільки досліджуваний оптичний елемент відповідає своїм каліброваним параметрам. Якщо кожна названа характеристика попадає у відповідний діапазон значень, то формується рішення «компонент відповідає калібрувальним характеристикам»; в протилежному випадку – «компонент не відповідає калібрувальним характеристикам».
6. Здійснюємо пошук найменшого значення матриць похибок $\min(\Delta M_{ij}(N \times N))$ за допомогою методів оптимізації двовимірних функцій. Отримані результати визначають необхідні налаштування в системі лазерної мюллер-поляриметрії, що забезпечують зменшення похибки вимірювань.

АНАЛІЗ ПОХИБОК ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ ММЗ ФАЗОВОЇ ПЛАТІВКИ В СИСТЕМІ

Фазозсуваюча напівхвильова платівка є оптичним схемотехнічним компонентом із лінійним двопротинезаломленням та фазовим зсувом на $\lambda/2$. Експериментальні результати щодо визначення просторових розподілів елементів ММЗ цієї фазової платівки в системі, наведеній на рисунку 1, а також розподілів похибок їх вимірювань, детально представлені на рисунку 2 та в таблиці 1.

Якщо значення статистичних характеристик $\{A, B, C, D\}$ двовимірного розподілу похибки $\Delta M_{ij}(N \times N)$ вимірюваного ММЗ досліджуваного компонента попадають в дозволений діапазон

$$\begin{aligned} A_d - \Delta A &\leq A \leq A_d + \Delta A; \\ B_d - \Delta B &\leq B \leq B_d + \Delta B; \\ C_d - \Delta C &\leq C \leq C_d + \Delta C; \\ D_d - \Delta D &\leq D \leq D_d + \Delta D; \end{aligned} \quad (3)$$

то за алгоритмом, наприклад, порогової класифікації формується автоматизоване рішення: «компонент відповідає калібрувальним характеристикам»; в протилежному випадку – «компонент не відповідає калібрувальним характеристикам».

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Таблиця 1 - Середні значення та СКВ похибок мюллер-матричного картографування фазової платівки

$\Delta M_{ij} (N \times N)$	Середнє значення похибки	СКВ похибки
ΔM_{11}	$0,044 \pm 0,003$	$0,015 \pm 0,07$
ΔM_{12}	$0,051 \pm 0,004$	$0,017 \pm 0,001$
ΔM_{13}	$0,061 \pm 0,004$	$0,020 \pm 0,001$
ΔM_{14}	$0,079 \pm 0,005$	$0,021 \pm 0,002$
ΔM_{21}	$0,060 \pm 0,004$	$0,019 \pm 0,001$
ΔM_{22}	$0,041 \pm 0,003$	$0,013 \pm 0,001$
ΔM_{23}	$0,059 \pm 0,004$	$0,020 \pm 0,002$
ΔM_{24}	$0,088 \pm 0,006$	$0,024 \pm 0,002$
ΔM_{31}	$0,041 \pm 0,003$	$0,013 \pm 0,001$
ΔM_{32}	$0,045 \pm 0,003$	$0,014 \pm 0,001$
ΔM_{33}	$0,052 \pm 0,004$	$0,015 \pm 0,001$
ΔM_{34}	$0,089 \pm 0,006$	$0,025 \pm 0,002$
ΔM_{41}	$0,078 \pm 0,005$	$0,024 \pm 0,002$
ΔM_{42}	$0,081 \pm 0,006$	$0,023 \pm 0,002$
ΔM_{43}	$0,090 \pm 0,006$	$0,024 \pm 0,002$
ΔM_{44}	$0,093 \pm 0,006$	$0,026 \pm 0,003$

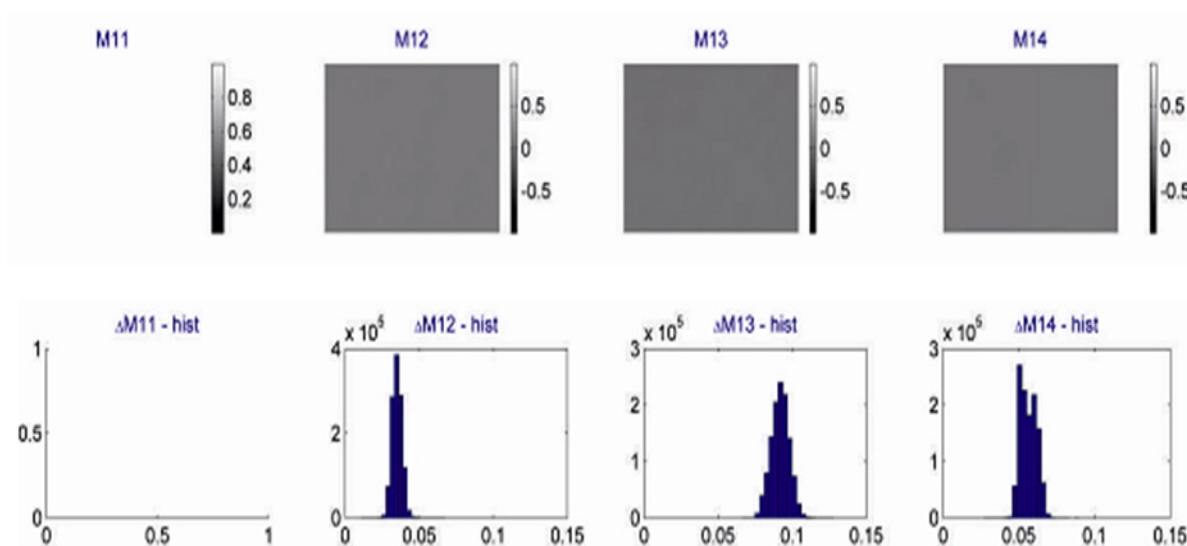


Рисунок 2 – Розподіли ММЗ пластинки $\lambda / 2$ та гістограми розподілів похибок $\Delta M_{ij} (N \times N)$

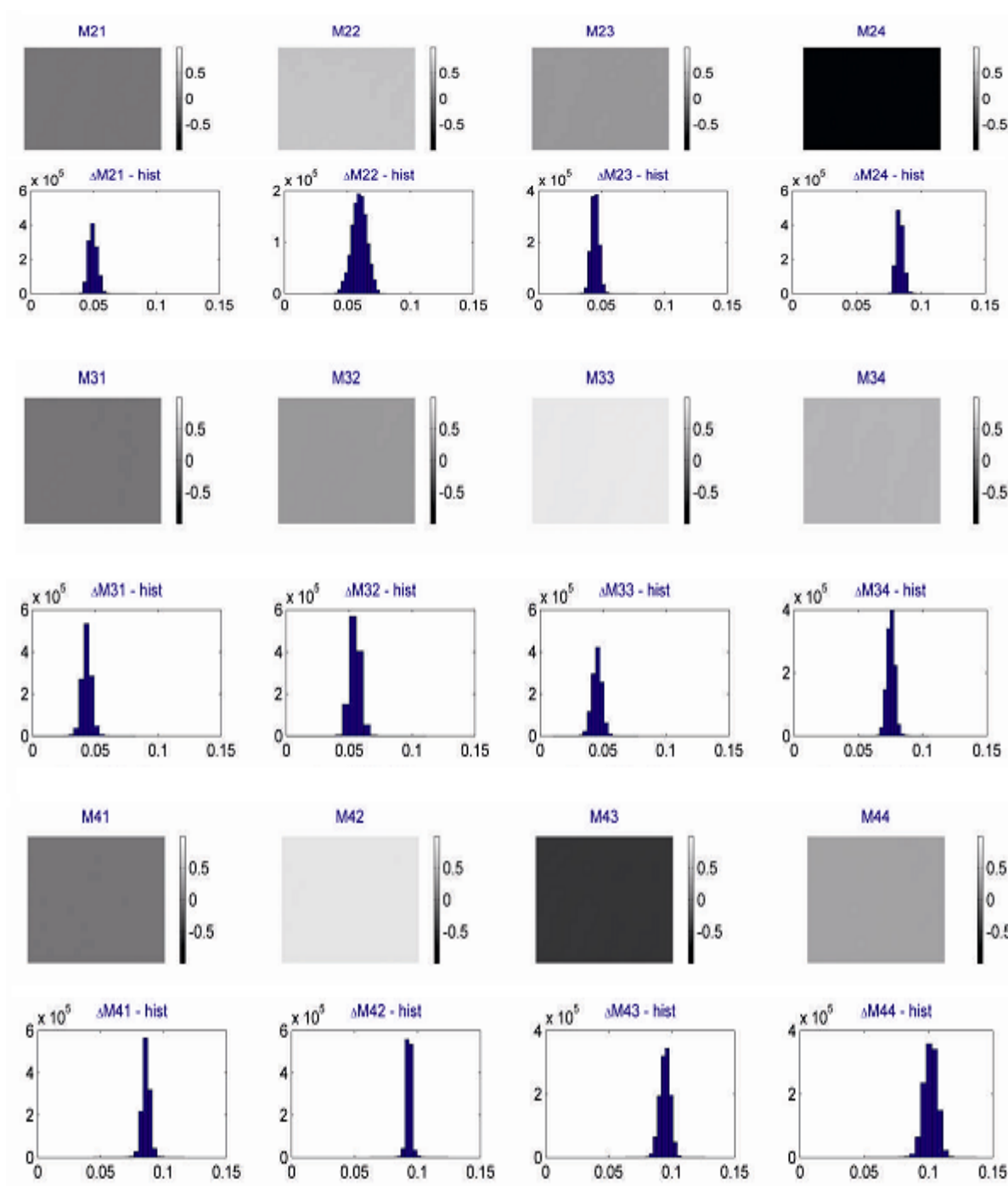


Рисунок 2 (продовження) – Розподіли ММЗ пластинки $\lambda / 2$ та гістограми розподілів похибок $\Delta M_{ij} (N \times N)$

Результати виконання програмного класифікаційного аналізу на основі алгоритму порогового оброблення тестових зразків таких оптичних компонентів, як фазові пластинки, наведено на рисунку 3.

Таким чином, в систему лазерної поляриметрії інтегровано новий інструмент, який забезпечує побудову не інтегрального, а просторового двовимірного розподілу похибок для кожного з 16 компонентів ММЗ, що використовуються під час калібрування досліджуваних оптичних компонентів. Додатково впроваджено метод аналізу, який ґрунтується на статистичних параметрах і пороговому алгоритмі класифікації, що дає змогу автоматично визначати підсумковий результат процесу калібрування оптичних елементів.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

muller_table_3_1_result.csv

1	M _{ij}	A	Delta_A	B	Delta_B	Висновок
2	M ₁₁	0.044	0.003	0.015	0.007	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
3	M ₁₂	0.051	0.004	0.017	0.001	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
4	M ₁₃	0.061	0.004	0.02	0.001	фазова пластинка відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
5	M ₁₄	0.079	0.005	0.021	0.002	фазова пластинка відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
6	M ₂₁	0.06	0.004	0.019	0.001	фазова пластинка відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
7	M ₂₂	0.041	0.003	0.013	0.001	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
8	M ₂₃	0.059	0.004	0.02	0.002	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
9	M ₂₄	0.088	0.006	0.024	0.002	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
10	M ₃₁	0.041	0.003	0.013	0.001	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
11	M ₃₂	0.045	0.003	0.014	0.001	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
12	M ₃₃	0.052	0.004	0.015	0.001	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
13	M ₃₄	0.089	0.006	0.025	0.002	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
14	M ₄₁	0.078	0.005	0.024	0.002	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
15	M ₄₂	0.081	0.006	0.023	0.002	фазова пластинка відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
16	M ₄₃	0.09	0.006	0.024	0.002	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
17	M ₄₄	0.093	0.006	0.026	0.003	фазова пластинка не відповідає заявленим калібрувальним характеристикам
18						

Рисунок 3 – Результат роботи програмного бінарного класифікатора щодо відповідності оптичного компонента калібрувальним характеристикам на основі виміряних ММЗ

ВИСНОВКИ

Розвинуто метод калібрування оптичних компонентів системи на основі визначення та аналізу двовимірних розподілів похибок вимірювання їх елементів ММЗ, який має розширені функціональні можливості за рахунок введення бінарної класифікації статистичних характеристик розподілів похибок вимірювань ММЗ досліджуваних оптичних компонентів.

Удосконалено архітектуру системи мюллер-матричного поляриметричного калібрування оптичних компонентів за рахунок введення програмного блоку аналізу похибок калібрування із відповідним зворотним зв'язком. Це дозволило реалізовувати в системі додаткову функцію по автоматичному формулюванню рішення щодо відповідності анізотропних параметрів контрольованого оптичного компонента калібрувальним характеристикам.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tiwari, V., Pandey, Y., Bisht, N. "Spatially Addressable Polarimetric Calibration of Reflective-Type Spatial Light Modulator Using Mueller–Stokes Polarimetry," *Frontiers in Physics*. Vol. 9. (2021) URL: <https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2021.709192>
2. Jesus del Hoyo, Luis Miguel Sanchez-Brea, Jose Antonio Gomez-Pedrero. "High precision calibration method for a four-axis Mueller matrix polarimeter," *Optics and Lasers in Engineering*. Vol. 132. (2020) URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106112>.
3. Zabolotna, N.I., Sholota, V.V., Okarskyi H.H., "Methods and systems of polarization reproduction and analysis of the biological layers structure in the diagnosis of pathologies," *Proceedings of SPIE*. 11369, 113691S, P. 501-513 (2020).
4. Vasyuk, V.L., Kalashnikov, A.V., Ushenko, A.G. et al., *Digital Information Methods of Polarization, Mueller-Matrix and Fluorescent Microscopy*, Springer Nature Singapore, 2023. 102 p.
5. Заболотна, Н.І., Радченко, К.О. "Аналіз похибок визначення матриці Мюллера біологічного шару в системі двовимірного мюллер-матричного картографування," *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. №2. С. 62–70. (2014).
6. Заболотна, Н.І. "Похибки вимірювань референтних матриць Мюллера в системі мюллер-матричного картографування біологічних шарів," *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. №1 (29). С. 109–117 (2015).
7. Zabolotna N.I., Pavlov S.V., Karas O.V., Sholota V.V. Processing and analysis of images in the multifunctional classification laser polarimetry system of biological objects. *Proceedings of SPIE*. 2018. 10750. 107500N.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

8. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
9. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.

REFERENCES

1. Tiwari, V., Pandey, Y., Bisht, N. “Spatially Addressable Polarimetric Calibration of Reflective-Type Spatial Light Modulator Using Mueller–Stokes Polarimetry,” *Frontiers in Physics*. Vol. 9. (2021) URL: <https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2021.709192>
2. Jesus del Hoyo, Luis Miguel Sanchez-Brea, Jose Antonio Gomez-Pedrero. “High precision calibration method for a four-axis Mueller matrix polarimeter,” *Optics and Lasers in Engineering*. Vol. 132. (2020) URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106112>.
3. Zabolotna, N.I., Sholota, V.V., Okarskyi H.H., “Methods and systems of polarization reproduction and analysis of the biological layers structure in the diagnosis of pathologies,” *Proceedings of SPIE*. 11369, 113691S, P. 501-513 (2020).
4. Vasyuk, V.L., Kalashnikov, A.V., Ushenko, A.G. et al., *Digital Information Methods of Polarization, Mueller-Matrix and Fluorescent Microscopy*, Springer Nature Singapore, 2023. 102 p.
5. Zabolotna, N.I., Radchenko, K.O. “Analiz pokhybok vyznachennia matrytsi Miullera biolohichnoho sharu v systemi dvovymirnoho miuller-matrychnoho kartohrafuvannia,” *Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii*. №2. S. 62–70. (2014).
6. Zabolotna, N.I. “Pokhybky vymiriuvan referentnykh matryts Miullera v systemi miuller-matrychnoho kartohrafuvannia biolohichnykh shariv,” *Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii*. №1 (29). S. 109–117 (2015).
7. Zabolotna N.I., Pavlov S.V., Karas O.V., Sholota V.V. Processing and analysis of images in the multifunctional classification laser polarimetry system of biological objects. *Proceedings of SPIE*. 2018. 10750. 107500N.
8. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
9. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.

Надійшла до редакції 1.08.2025р.

ЗАБОЛОТНА НАТАЛІЯ ІВАНІВНА – д.т.н., доцент, професор кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна,
e-mail: Natalia.zabolotna@gmail.com

ШВИДЮК ОЛЕГ СЕРГІЙОВИЧ – аспірант, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, **e-mail: olegshvydiuk@gmail.com**

N.I. ZABOLOTNA, O.S. SHVYDIUK

SYSTEM AND METHOD OF POLARIMETRIC CALIBRATION OF OPTICAL COMPONENTS BASED ON THE MÜLLER-MATRIX APPROACH

Vinnitsia National Technical University