

- Development Technologies I. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 511. Springer, Cham. pp 49–83. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44347-3_2
- [2] Liu X., Jiang Z., Niu C., et al. "Infrared Imaging System with a Local Polarization Channel for Target Detection". *Appl. Sci.* 2024, 14, 10659. <https://doi.org/10.3390/app142210659>
- [3] S. Klonus and M. Ehlers, "Performance of evaluation methods in image fusion," *12th International Conference on Information Fusion*, Seattle, WA, USA, 2009, pp. 1409-1416.
- [4] G. Bernardi, G. Brisebarre, S. Roman, et al. "A comprehensive survey on image fusion: Which approach fits which need", *Information Fusion*, Volume 126, Part A, 103594, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2025.103594>.
- [5] Holst G.C. *Electro-Optical Imaging System Performance*, Fifth Edition. JCD Publishing, (2008).
- [6] Ratches J.A. "Static performance model for thermal imaging systems". *Opt.Eng.* - 1976, v.15, №3. P. 525-530.
- [7] Leachtenauer J.C. "National imagery interpretability rating scales: overview and product description". *ASPRS/ASCM Annual Convention and Exhibition Technical Papers: Remote Sensing and Photogrammetry*. 1996, №1. P. 262-272.

УДК 535.317.9

ЗУМ-ПРОЄКЦІЙНІ ОПТИЧНІ СИСТЕМИ НА НЕРУХОМИХ ВАРІОЛІНЗАХ

Чиж І.Г.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

i.g.chizh@gmail.com

Машинний зір та оптика безпілотних літальних апаратів, засобів телескопії, мікроскопії, ендоскопії, оптичної далекометрії, оптичної когерентної томографії та іншої оптичної апаратури можуть мати в своєму складі зум-оптичні системи, що істотно розширюють функціональні можливості вказаної техніки []. В зум-оптичних системах, побудованих на оптичних компонентах з фіксованими оптичними силами, використовуються механізми пересування цих компонентів вздовж оптичної осі. В таких системах кількість компонентів не менша трьох і вони пересуваються вздовж оптичної осі механізмами, що мають, як правило, нелінійну передавальну функцію. Тому їх присутність суттєво ускладнює зум-оптичні системи та збільшує їх габарити і вартість

Потреба усунення вказаного недоліка призвела до появи та розвитку адаптивних оптичних лінз, що здатні в широких межах змінювати оптичну силу під дією систем зовнішнього електричного керування. Вказані лінзи дозволяють створювати зум-оптичні системи без рухомих компонентів при їх мінімальній кількості.

Наразі відомими виробниками адаптивних лінз є компанії Corning® Varioptic® та Optotune®. Компанія Corning® Varioptic® спеціалізується на виробництві варіолінз, що функціонують на ефекті електрозмочуваності, компанія Optotune® -

на виробництві мембранних варіолінз [1, 2, 3]. На ринку вже рекламуються оптичні вироби, в яких застосовуються вказані елементи. Оптичні системи цих виробів, та методи їх проєктування компаніями розробників не розкриваються, що є природнім в конкурентному середовищі. Тому виникає потреба у наявності доступних для розробників оптичної апаратури алгоритмів і методів проєктування зум-оптичних систем, в яких передбачається використання адаптивних варіолінз. В зв'язку з цим розробка таких алгоритмів і методів має як теоретичне так і практичне значення.

Основна увага в цій роботі приділена створенню двокомпонентних зум-проєкційних систем з фіксованою проєкційною відстанню, якими забезпечується зміна поперечного збільшення в заданому інтервалі значень, і які повинні мати в своєму складі тільки нерухомі оптичні адаптивні компоненти.

На рис. 1 показано двокомпонентну зум-проєкційну оптичну систему, в якій осьові відстані a_1, d, a'_2, L , де $L = -a_1 + d + a'_2$, є фіксованими та незмінними, при цьому поперечне збільшення β в оптично сполучених площинах об'єкта (ПП) та зображення (ПЗ) змінюється у потрібному діапазоні. Оптичні сили використаних в системі нерухомих варіо-лінз 1 і 2 не виходять за межі, вказані в їх технічних характеристиках.

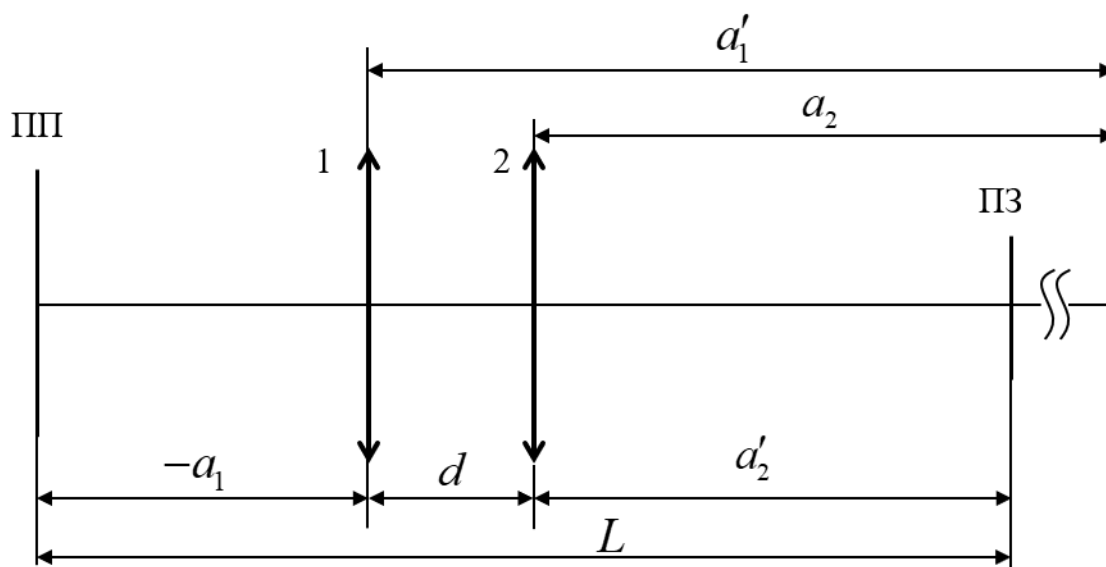


Рис.1 Схема двокомпонентної зум-оптичної проєкційної системи на нерухомих варіолінзах

Лінійне збільшення зображення, сформованого лінзою 1: $\beta_1 = \frac{a'_1}{a_1}$, де

відповідно до формули Гаусса, [4]: $a'_1 = \frac{a_1 \cdot f'_{1\text{var}}}{a_1 + f'_{1\text{var}}}$.

Оскільки $\beta_1 = \frac{a'_1}{a_1}$, то

$$\beta_1 = \frac{f'_{1\text{var}}}{a_1 + f'_{1\text{var}}}, \quad (1)$$

де $f'_{1\text{var}}$ - задня фокусна відстань першої варіолінзи.

Поперечне збільшення вторинного зображення, сформованого лінзою 2, $\beta_2 = \frac{a'_2}{a_2}$, при заданому фіксованому значенні відрізка a'_2 і

$$a_2 = a'_1 - d = \frac{a_1 \cdot f'_{1\text{var}}}{a_1 + f'_{1\text{var}}} - d \quad (2)$$

визначається формулою
$$\beta_2 = \frac{a'_2(a_1 + f'_{1\text{var}})}{(a'_2 - L)f'_{1\text{var}} - a_1 d}. \quad (3)$$

При цьому потрібне поперечне збільшення β у площинах ПП і ПЗ

$$\beta = \beta_1 \cdot \beta_2. \quad (4)$$

Підстановка (1) и (3) в формулу (4) дозволяє знайти потрібну залежність фокусної відстані варіолінзи 1 від поперечного збільшення системи β :

$$f'_{1\text{var}}(a_1, d, a'_2) = \frac{a_1 d \beta}{(a_1 - d)\beta - a'_2} \quad (5)$$

або її оптичної сили в діоптріях:

$$\Phi_{1\text{var}}(\beta) = 1000 \frac{(a_1 - d)\beta - a'_2}{a_1 d \beta} \quad (6)$$

Функція $f'_{1\text{var}}(\beta)$ після її підстановки у формулу (2) дозволяє встановити залежність $a_2(\beta)$, при цьому задня фокусна відстань варіолінзи 2, що забезпечує потрібне значення β , визначається формулою:

$$f'_{2\text{var}}(\beta) = \frac{a_2(\beta) \cdot a'_2}{a_2(\beta) - a'_2}, \quad (7)$$

звідки оптична сила цієї лінзи в діоптріях:

$$\Phi_{2\text{var}}(\beta) = 1000 \frac{a_2(\beta) - a'_2}{a_2(\beta) \cdot a'_2}. \quad (8)$$

Формули (5) - (8) дозволяють не тільки визначати залежності $f'_{1\text{var}}(\beta)$, $f'_{2\text{var}}(\beta)$, $\Phi_{1\text{var}}(\beta)$, $\Phi_{2\text{var}}(\beta)$ але і встановлювати ті конкретні значення a_1, d, a'_2, L , за яких можна забезпечити необхідний діапазон змін значення β з огляду на фактичні обмеження діапазону оптичних сил варіолінз.

При цьому задача габаритного розрахунку зум-оптичної проєкційної системи зводиться до пошуку оптимального співвідношення між довжинами відрізків a_1, d, a'_2 , якщо проєкційна дистанція L є фіксованою, а діапазон зміни поперечного збільшення β заданий.

Попередній аналіз функцій (6) і (8) показав, що при потребі мати збільшене і перевернуте зображення, оптична сила першої варіолінзи зум-проєкційної системи повинна бути більшою за абсолютною величиною оптичної сили другої варіолінзи, [5]. Тому при вище вказаних умовах до пошуку оптимальних співвідношень між a_1, d, a'_2 потрібно додавати обмеження на оптичну силу першої варіолінзи з урахуванням реальних технічних характеристик і параметрів її конкретної моделі. Для цього потрібно знайти екстремум функції $f'_{1\text{var}}(a_1, d, a'_2)$ при фіксованому граничному значенні поперечного збільшення β .

Згідно рис.1 $L = -a_1 + d + a'_2$, тому кожному відрізку, що входить в праву частину цього рівняння, належить якась доля проєкційної відстані L . Так $-a_1 = k_1 L$, $d = k_2 L$, $a'_2 = k_3 L$, при цьому $k_1 + k_2 + k_3 = 1$. Зробивши у виразі (6) ці заміни отримуємо рівняння:

$$\Phi_1(k_1, k_2) = \frac{1000}{L} \left[\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \left(\frac{1}{k_1 k_2} - \frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2} \right) \frac{1}{\beta} \right]. \quad (9)$$

Пошук екстремуму функції $\Phi_1(k_1, k_2)$ потребує складання системи двох рівнянь, кожне з яких є прирівняною до нуля похідною $\Phi_1(k_1, k_2)$ від аргументів k_1, k_2 .

Зручніше брати похідні від цієї функції після заміни $\frac{1}{k_1} = q_1$, $\frac{1}{k_2} = q_2$. Тоді рівняння

(9) отримає вигляд

$$\Phi_1(q_1, q_2) = \frac{1000}{L} \left[q_1 + q_2 + (q_1 q_2 - q_1 - q_2) \frac{1}{\beta} \right]. \quad (10)$$

Похідні по q_1 і q_2 від правої частини рівняння (10) прирівняні до нуля дають в кінцевому вигляді два рівняння

$$q_1 = 1 - \beta \quad \text{і} \quad q_2 = 1 - \beta.$$

При таких значеннях аргументів функція $\Phi_1(q_1, q_2)$ має екстремальне значення, яке можна пов'язати з граничними значеннями оптичної сили конкретних моделей варіолінз, що показано нижче.

Отриманий результат дозволяє зробити розрахунок оптимальних значень відрізків a_1, d, a'_2 . Так, наприклад, при потрібному діапазоні поперечного збільшення від -1 до -4 беремо крайнє значення -4, тоді

$$q_1 = 1 - \beta = 1 - (-4) = 5, \quad q_2 = 1 - \beta = 1 - (-4) = 5.$$

При цьому екстремальне значення функції

$$\Phi_1(q_1, q_2) = \frac{1000}{L} \left[q_1 + q_2 + (q_1 q_2 - q_1 - q_2) \frac{1}{\beta} \right] = \frac{1000}{L} \left[5 + 5 + (5 \cdot 5 - 5 - 5) \frac{1}{-4} \right] = \frac{6250}{L} [\text{мм}]$$

Якщо, наприклад, в якості першого компонента проєкційної системи обирається модель ML-20-37 варіолізи виробництва компанії Optotune, яка має максимальне значення оптичної сили +18 діоптрій, [6], то значення проєкційної відстані повинно бути $L = \frac{6250}{18} = 347.22 [\text{мм}]$. А коефіцієнти $k_1 = \frac{1}{5} = 0.2$,

$$k_2 = \frac{1}{5} = 0.2, \quad k_3 = 1 - 0.2 - 0.2 = 0.6.$$

При цьому значення відрізків

$$a_1 = -k_1 \cdot L = -0.2 \cdot 312.5 = -69.44 [\text{мм}]$$

$$d = k_2 L = 0.2 \cdot 312.5 = 69.44 [\text{мм}]$$

$$a'_2 = k_3 L = 0.6 \cdot 312.5 = 208.33 [\text{мм}].$$

На рис.2 показано графіки залежності оптичних сил обох варіолінз проєкційної системи, яка відповідає вище наведеному результату розрахунків відрізків a_1, d, a'_2 , що забезпечують на проєкційній відстані 347.2 мм зміну поперечного збільшення в діапазоні $\beta \in [-4 \div -1]$.

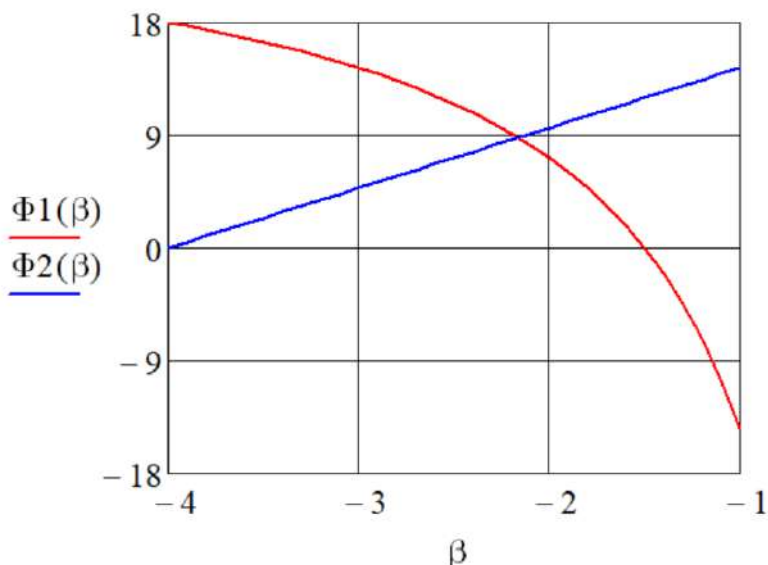


Рис.2 Графіки функцій залежності оптичної сили в діоптріях обох компонентів від значень поперечного збільшення проєкційної зум-оптичної системи

Висновки

1. Обґрунтований в даній роботі метод підтверджує теоретичну і практичну можливість синтезу двокомпонентних зум-проекційних систем з фіксованою проекційною відстанню на базі використання нерухомих електрично-керованих варіолінз.
2. Теоретично отримані функціональні залежності між оптичними силами варіолінз і поперечним збільшенням зображення дозволяють коректно програмувати драйвери і забезпечувати тим самим потрібне функціонування зум-проекційної оптики в складі автоматизованих технічних систем.
3. Для скорочення проекційної відстані і зростання діапазону варіацій поперечного збільшення зображень потрібно розширювати робочі діапазони оптичної сили варіолінз, що є необхідним напрямком їх подальшого вдосконалення
4. Наступні дослідження розглянутої зум-проекційної системи повинні бути спрямованими на пошук умов забезпечення потрібної якості зображення на всьому робочому діапазоні її функціонування

Ключові слова: двокомпонентна зум-оптична проекційна система, нерухомі варіолінзи в зум-оптичній системі

Література

- [1] Hongwen Ren, Shin-Tson Wu «Introduction to Adaptive Lenses» A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2012, P.274. <https://doi.org/10.1002/9781118270080>
- [2] Shibiao Li, Lin Liu, Haoyue Xing, Zhaohui Li, Yang Cheng «Adaptive Varifocal Lenses Based on Dielectric Elastomer Actuator» Photonics 2025, 12(3), 227. <https://doi.org/10.3390/photonics12030227>
- [3] Варіолінзи як нерухомі елементи зум-оптичних систем KPI Science News 2026 №1, с. 50 - 59. DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2026>
- [4] Чиж І.Г. «Теорія оптичних систем» Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 426 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/46029.2>
- [5] Chyzh I. Zoom vario-optical systems of optoelectronic sensors with immobile components Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології № 2 (50), 2025, pp 251-268 <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2025-50-2-251-268>
- [6] Каталог оптичних виробів «Edmund Optics»