

УДК 535.317.2

**ТРИКОМПОНЕНТНІ ЛІНЗОВІ ЗУМ-АФОКАЛЬНІ СИСТЕМИ
ЗУМ-ТРАНСФОКАТОРІВ НИТЯНИХ ДАЛЕКОМІРІВ***Лазаренко К. С., Чиж І. Г.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: i.g.chizh@gmail.com, karinalisnak97@gmail.com*

Проблематика роботи: Синтез зум-трансфокаторів, у складі яких використовується зум-афокальні системи разом із фікс-об'єктивами; створення методу параметричного синтезу трикомпонентної зум-афокальної системи зум-трансфокатора на основі вимог до потрібного діапазону зміни кутового збільшення, допустимого зрізання периферійних пучків променів, поля зору системи та зовнішнього розташування апертурної діафрагми.

Мета дослідження. Розробка придатного до комп'ютерної автоматизації методу синтезу трикомпонентної зум-афокальної системи.

Методика реалізації. Використовується теорія оптичних систем, складених з тонких компонентів. На базі вказаної теорії складається система рівнянь, у якій відстані між компонентами є невідомими. Для забезпечення технологічності перший і третій компоненти системи є ідентичними. За допомогою формул кутів і висот нульових променів, з урахуванням вимог до допустимого він'єтування пучків та кутів поля зору трансфокатора, розраховуються потрібні світлові діаметри компонентів.

Результати дослідження. Отримані формули габаритного розрахунку зум-афокальної системи дозволяють враховувати вимоги до поздовжніх та поперечних габаритів системи, положення апертурної діафрагми, визначати фокусні відстані компонентів та їх взаємне розташування залежно від кутового збільшення на всьому діапазоні його зміни. Встановлено, що трикомпонентна система з ідентичними першим та другим компонентами має змінну осьову довжину, яка є максимальною при кутовому збільшенні.

Висновки. Створений метод параметричного синтезу трикомпонентної зум-афокальної системи для зум-трансфокатора, в якому апертурною діафрагмою слугує апертурна діафрагма фікс-об'єктиву, дозволяє автоматизувати габаритний розрахунок системи і визначити закони лінійного переміщення її компонентів вздовж оптичної осі.

Ключові слова: зум-трансфокатор; зум-афокальна система; трикомпонентна зум-афокальна система.

Вступ

Один із видів оптичних далекомірів – пасивні, які не опромінюють об'єкти далекометрії. Це надає їм можливість залишатись непомітними і тому вони широко використовуються в військовій справі.

У дослідженні [1] було проаналізовано різні типи далекомірів та показано, що сучасні пасивні далекоміри можуть бути побудовані за принципом нитяного далекоміра з використанням трансфокатора, який має зум-афокальну оптичну систему. Регулювання фокусної відстані трансфокатора дозволяє розширити діапазон паралактичного кута далекоміра, що забезпечує суттєве розширення його функціональної здатності.

Зум-афокальна система має важливі вимоги щодо світлосили, усунення він'єтування пучків променів і збереження якості зображення по всьому полю зору. До того ж, зум-афокальна система повинна мати найбільш простий закон і нескладну механічну систему для переміщень її оптичних компонентів. Однак виконання всіх цих вимог є складною задачею, як підтверджують численні

публікації на цю тему [2 - 9]. Складність задачі зростає, коли вихідна зніця афокальної системи має бути суміщеною із віддаленою вхідною зніцею фікс-об'єктиву, що знаходиться поза афокальною системою.

Для зменшення він'єтування необхідне істотне збільшення діаметру світлового отвору вхідного та наступного компоненту афокальної системи, що супроводжується збільшенням їх відносних отворів та суттєвим зростанням їх аберацій. І це є проблемою.

Тому потрібно знайти способи зменшення відносного отвору вхідних компонентів на етапі ескізного проектування зум-афокальної системи, зокрема на етапах структурного синтезу та габаритного розрахунку.

Трикомпонентна структура є найпростішою для зум-афокальної системи, тому дослідження властивостей та пошук алгоритму ескізного проектування доцільно проводити на трикомпонентних системах.

Постановка задачі

Завданням даної роботи є розробка алгоритму для створення прототипу оптичної системи зум-афокального типу, що складається з трьох компонентів лінз та має вихідну знічку, розташовану за межами системи. Алгоритм повинен бути орієнтованим на розв'язок задач, що виникають при створенні оптичних систем зум-трансфокаторів для нитяних далекомірів, та адаптованим до комп'ютерної автоматизації проектування трикомпонентних зум-афокальних систем, що необхідно на стадії їх параметричного синтезу.

Синтез поздовжніх габаритних параметрів для трикомпонентної зум-афокальної оптичної системи

Оптичні системи зум-афокального типу розробляються з метою забезпечення плавної зміни кутового збільшення γ_{var} в заданому діапазоні. Ця можливість дозволяє збільшувати або зменшувати кутовий розмір поля зору в оптичному приладі зі стаціонарним об'єктивом та зум-афокальною насадкою у кратному режимі. Наприклад, для забезпечення проміжного значення кутового збільшення $\gamma=1$ потрібне симетричне розташування компонентів оптичної системи трикомпонентної афокальної системи, яка показана в тонких компонентах на рис. 1.

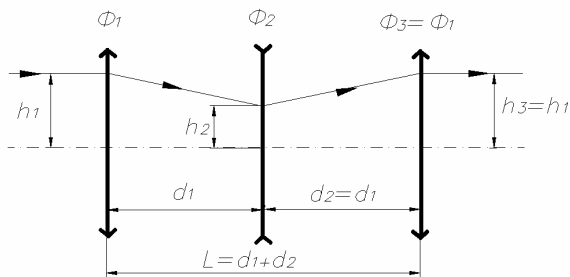


Рис. 1. Симетрична зум-афокальна система з кутовим збільшенням $\gamma=1$ в тонких компонентах

Прилад зі стаціонарним об'єктивом та афокальною системою, яку показано на рис. 1, має зображення та кутовий розмір поля зору 2ω , що дорівнює кутовому розміру поля зору приладу без використання насадки.

На симетричність системи вказує те, що $\Phi_1 = \Phi_3$ і $d_1 = d_2$, в той час, як висота нульового променя $h_3 = h_1$. З урахуванням того, що оптична сила афокальної системи дорівнює нулю та відповідно до формули оптичної сили багатоконпонентної системи, зазначеної в [9], маємо:

$$\Phi = h_1\Phi_1 + h_2\Phi_2 + h_3\Phi_3 = 0. \quad (1)$$

Оскільки нульовий промінь входить в оптичну систему паралельно до оптичної осі, то друга

висота нульового променя буде дорівнювати $h_2 = h_1(1 - d_1\Phi_1)$.

Підставивши значення h_1, h_2, h_3 в (1), маємо рівняння $2\Phi_1 + \Phi_2 - d_1\Phi_1\Phi_2 = 0$.

Завдяки отриманому рівнянню можна визначити:

$$d_1 = \frac{2\Phi_1 + \Phi_2}{\Phi_1\Phi_2} = \frac{2}{\Phi_2} + \frac{1}{\Phi_1} = 2f_2' + f_1',$$

де f_1' – фокусна відстань крайніх компонентів, а f_2' – фокусна відстань середнього компонента.

Осьова довжина L афокальної системи дорівнює:

$$L = 2d_1 = 2f_1' + 4f_2'. \quad (2)$$

З виразу (2) можна побачити, що значення $\gamma=1$ можна отримати при будь-якому співвідношенні $k = \frac{f_1'}{f_2'} = \frac{\Phi_2}{\Phi_1}$.

Однак, для зменшення осьової довжини L фокусні відстані f_1', f_2' повинні бути протилежними за знаками.

Тому афокальні трикомпонентні системи будемо аналізувати з протилежними значеннями фокусних відстаней f_1', f_2' , що відповідає від'ємному значенню коефіцієнта k .

Наприклад, при $f_1' = -2f_2'$ ($k = -2$), згідно з виразом (2), афокальна система теоретично отримуватиме мінімальну нульову осьову довжину.

Для отримання більшого значення кутового збільшення γ другий компонент системи потрібно перемістити праворуч, як показано на рис. 2. Натомість, для зменшення кутового збільшення γ доцільно перемістити середній компонент ліворуч. Якщо метою є збереження прямого зображення при зміні відстаней d_1, d_2 , утвореного афокальною системою, то вона має бути галілеєвського типу. У такій системі перший компонент виконує функцію об'єктиву, а другий і третій компоненти разом – функцію окуляру з від'ємною фокусною відстанню.

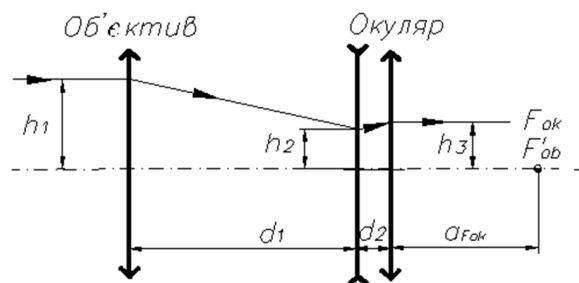


Рис. 2. Зум-афокальна система при кутовому збільшенні $\gamma > 1$

Водночас, оптична сила об'єктиву визначається, як $\Phi_{ob} = \Phi_1$, а оптична сила окуляру, як

$\Phi_{ок} = \Phi_2 + \Phi_3 - d_2 \Phi_2 \Phi_3$. Врахувавши, що $\Phi_3 = \Phi_1$, кутове збільшення γ показаної на рис. 2 системи визначається відношенням:

$$\gamma = -\frac{f'_{об}}{f'_{ок}} = -\frac{\Phi_{ок}}{\Phi_{об}} = -\frac{\Phi_2 + \Phi_1 - d_2 \Phi_2 \Phi_1}{\Phi_1} = -(1+k-d_2\Phi_2)$$

звідки можна знайти осьову довжину

$$d_2 = \frac{1+k+\gamma}{\Phi_2}. \quad (3)$$

Отриманий вираз (3) показує, що при $\Phi_2 < 0$ і $d_2 > 0$ чисельник $1+k+\gamma < 0$, а коефіцієнт $k < -(1+\gamma)$. Наприклад, при максимальному значенні $\gamma = 3$ коефіцієнт k може приймати тільки значення $k < -4$.

Для того, щоб афокальна система мала вигляд, який характерний для телескопічної системи Галілея, необхідно, щоб дійсний задній фокус об'єктива був суміщеним з уявним переднім фокусом окуляру, який знаходиться за окуляром. Цю умову можна виконати, коли:

$$d_1^* + a_{F_{ок}} = f'_{об} = f'_1, \quad (4)$$

де $a_{F_{ок}}$ – передній фокальний відрізок окуляру.

Якщо врахувати вирази згідно з [9] та $\Phi_3 = \Phi_1$,

$$a_{F_{ок}} = f_{ок} (1 - d_2 \Phi_3) = f_{ок} (1 - d_2 \Phi_1),$$

$$f_{ок} = -\Phi_{ок}^{-1} = -(\Phi_1 + \Phi_2 - d_2 \Phi_1 \Phi_2)^{-1},$$

$$\text{то } a_{F_{ок}} = -\frac{1 - d_2 \Phi_1}{\Phi_1 + \Phi_2 - d_2 \Phi_1 \Phi_2}.$$

Після підстановки цих значень у рівняння (4) та відповідних перетворень, отримуємо наступну формулу:

$$d_1 = \frac{1}{\Phi_2} \left(k + \frac{k - d_2 \Phi_2}{1 + k - d_2 \Phi_2} \right). \quad (5)$$

Врахувавши вирази (3) та (5), можна отримати загальну осьову довжину зум-афокальної системи:

$$L(k, \gamma) = d_1 + d_2 = \frac{1}{\Phi_2} \left(1 + 2k + \gamma + \frac{1+\gamma}{\gamma} \right). \quad (6)$$

Вираз (6) вказує на те, що осьова довжина такої системи залежить від значень параметрів γ та k , і не є сталою при зміні цих параметрів. Ця залежність є прямо пропорційною коефіцієнту k та нелінійно залежить від значення γ . Крім того, за формулою (7) можна знайти максимальне значення функції при певних значеннях параметрів. Наприклад, при $\gamma = 1$ функція $L(\gamma)$ досягає максимального значення.

$$L_{\max} = \frac{2}{\Phi_2} (2+k) = 2(2+k)f'_2. \quad (7)$$

Отриманий вираз дозволяє визначити необхідні значення Φ_2 і Φ_1 , або f'_2 і f'_1 , при габаритному розрахунку зум-афокальної системи. Якщо на початку проектування відомі допустиме значення L_{\max} та граничне максимальне значення γ . Водночас, коефіцієнт k повинен задовольняти умову $k < -(1+\gamma)$.

На рис. 3 показано графіки залежностей значень відрізків d_1 , d_2 та їх суми $L(\gamma)$, максимальне значення якої нормовано до 1, при зміні значень γ , яке змінюється в інтервалі від 3^{-1} до 3, забезпечуючи 9-кратну зміну поля зору трансфокатору з даною зум-афокальною системою.

Графіки на рис. 3 надають змогу побачити, що відстань d_2 між середнім та останнім компонентами залежить від значення γ лінійно, тому для переміщення середнього компоненту вздовж оптичної осі достатньо простого лінійного механізму. Однак залежність $d_1(\gamma)$ для першого компоненту є нелінійною, тому для його переміщення потрібен більш складний механізм. Також варто зазначити, що на краях діапазону зміни γ осьова довжина зум-афокальної системи має мінімальне значення.

У додаток до цього, можна зазначити, що має місце рівняння $L(\gamma) = L(\gamma^{-1})$, яке показує, що афокальна система зум-афокального типу віртуально повертається на 180° .

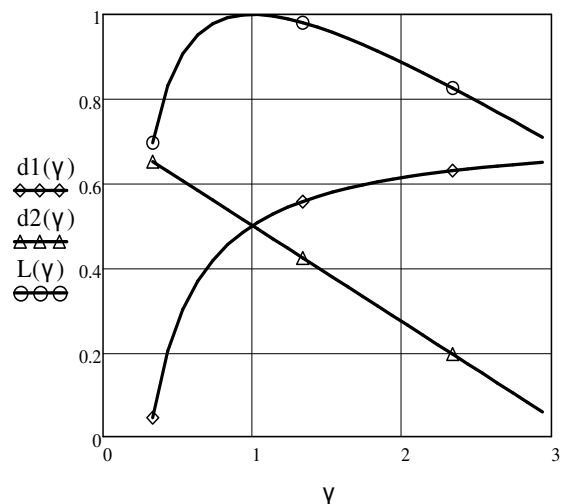


Рис. 3. Нормовані графіки, що демонструють залежність взаємного положення компонентів та осьової довжини зум-афокальної системи від зміни значень кутового збільшення γ

Синтез поперечних габаритних параметрів для трикомпонентної зум-афокальної оптичної системи

При розрахунку габаритних параметрів зум-афокальної оптичної системи, окрім врахування відстані, на якій розташовані компоненти, необхідно також визначити світлові діаметри цих компонентів, які впливають на розміри поля зору та обмеження потоків випромінювання, що входять до фікс-об'єктиву, розташованого за афокальною системою. В телескопічній системі Галілея польова діафрагма не може бути встановлена, тому поле зору обмежується він'єтувальними діафрагмами, які утворюються з оправ лінзових компонентів зум-афокальної системи.

Він'єтувальні діафрагми не повинні обмежувати поле зору фікс-об'єктиву, з яким афокальна система утворює зум-трансфокатор. При розрахунку розмірів цих діафрагм, слід звернути увагу на той фактор, що апертурна діафрагма фікс-об'єктиву є апертурною діафрагмою зум-трансфокатора.

Оскільки вхідна зіниця фікс-об'єктиву розташована за афокальною системою, це призводить до збільшення світлових діаметрів її компонентів. Завдання розрахунку габаритів компонентів зум-афокальної системи полягає в тому, щоб забезпечити збереження розмірів поля зору 2ω фікс-об'єктиву у всьому заданому діапазоні значень γ , забезпечуючи допустиме він'єтування пучків променів, що входять до системи з країв поля зору.

Для визначення світлових діаметрів \varnothing_1 , \varnothing_2 , \varnothing_3 компонентів афокальної системи, потрібно знати: кут поля зору фікс-об'єктиву 2ω , діаметр вхідної зіниці фікс-об'єктиву D , відрізок t , що показує розташування вхідної зіниці відносно останнього компонента афокальної системи та допустиме значення коефіцієнту він'єтування k_ω пучка променів, що надходить в афокальну систему від краю поля зору.

Для визначення діаметрів компонентів можна використовувати формули висот і кутів нульового променя [9], який обирається згідно з заданим значенням.

Якщо необхідно встановити значення $k_\omega=1$, потрібно обчислити висоти променів на кожному компоненті системи, які проходять через верхній край отвору першого компонента, що належить верхньому крайньому нахиленому пучку. Подвоєні значення висот такого променя на всіх компонентах афокальної системи відповідають їх світловим діаметрам.

Формули розрахунку діаметрів \varnothing_1 , \varnothing_2 , \varnothing_3 при $k_\omega=1$ $\varnothing_1 = 2[bt - d_1 - d_2 + d_1d_2\Phi_2]tg\omega + bD$;

(8)

$$\varnothing_2 = 2(ta - d_2)tg\omega + aD; \quad (9)$$

$$\varnothing_3 = 2ttg\omega + D, \quad (10)$$

де $a = 1 - d_2\Phi_1$; $b = a - d_1(\Phi_1 + a\Phi_2)$.

Якщо потрібно розрахувати світлові діаметри компонентів при допустимому значенні коефіцієнту він'єтування $k_\omega=0,5$ можна обчислити хід променя, що проходить через осьову точку вхідної зіниці і є середнім в пучку, що надходить через край першого компонента (див. рис. 4).

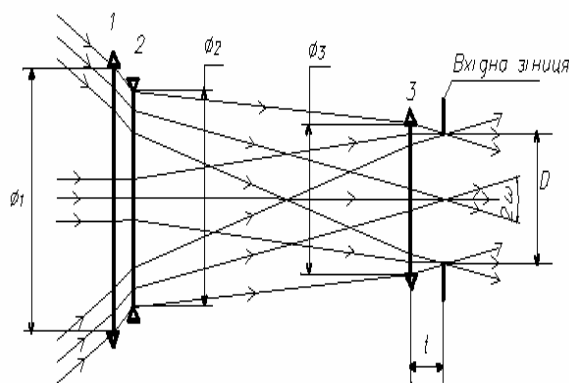


Рис. 4. До габаритного розрахунку світлових діаметрів \varnothing_1 , \varnothing_2 , \varnothing_3

За вказаних умов розрахунок можна здійснити за формулами (8)-(9), підставивши значення $D = 0$, що перетворюються до наступного вигляду:

$$\varnothing_1 = 2[bt - d_1 - d_2 + d_1d_2\Phi_2]tg\omega; \quad (11)$$

$$\varnothing_2 = 2(ta - d_2)tg\omega; \quad (12)$$

$$\varnothing_3 = 2ttg\omega. \quad (13)$$

На рис. 5 та рис. 6 показані графіки функцій $\varnothing_1(\gamma)$, $\varnothing_2(\gamma)$, $\varnothing_3(\gamma)$, отриманих за допомогою формул (8) – (10) для зум-афокальної системи з вихідними даними $L_{\max} = 100$ мм, $\gamma \in [0.333...3]$, $k = -4.2$, $t = 10$ мм, $D = 20$ мм.

На рисунку 5 представлені графіки, які показують розміри світлових діаметрів компонентів, при яких немає він'єтування на всьому діапазоні зміни кутового збільшення γ . Графіки на рис. 6 показують необхідні світлові діаметри компонентів при допустимому значенні $k_\omega = 0.5$.

При визначенні діаметрів компонентів за цими графіками необхідно вибирати їх розміри таким чином, щоб в робочому діапазоні значень γ вони мали найбільші значення.

Згідно графіків на рис. 5, для першого компонента потрібен світловий діаметр 105 мм, для другого - 30,5 мм, для третього - 23,5 мм. Згідно графіків на рис. 6, для першого компонента необхідно мати світловий діаметр не менше 78 мм, для другого - 24 мм, для третього - 3,5 мм.

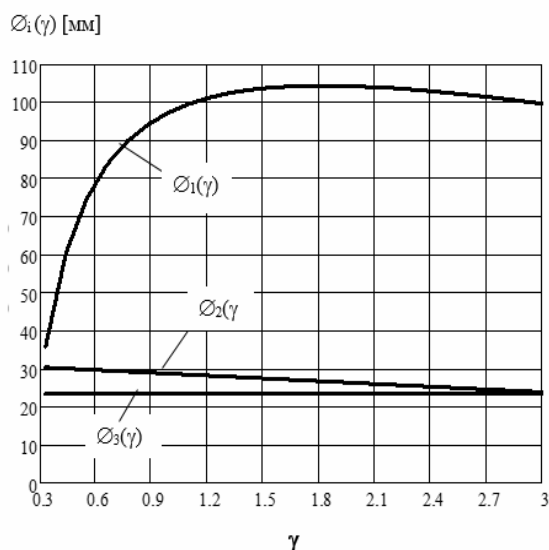


Рис. 5. Графіки функцій $\varnothing_1(\gamma)$, $\varnothing_2(\gamma)$, $\varnothing_3(\gamma)$ при $k_{\omega} = 1$

Графіки на рис. 5 та рис. 6 можуть допомогти обмежити діапазон зміни кутового збільшення або виключити окремі ділянки цього діапазону з практичного застосування, якщо поперечні габарити першого компоненту на цих ділянках перевищують допустимі значення.

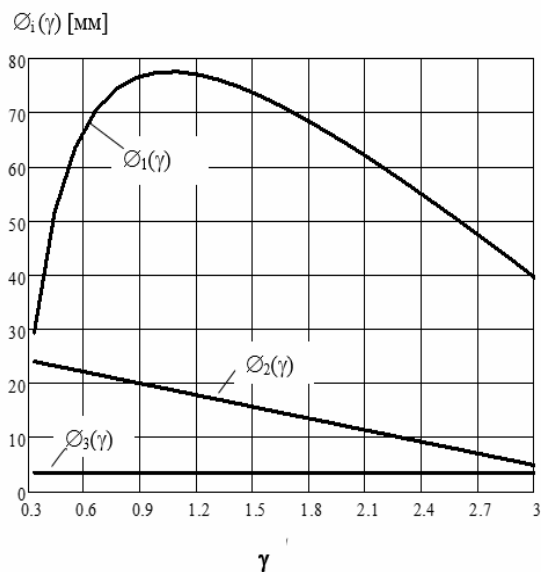


Рис. 6. Графіки функцій $\varnothing_1(\gamma)$, $\varnothing_2(\gamma)$, $\varnothing_3(\gamma)$ при $k_{\omega} = 0.5$

Висновки

Внаслідок проведених досліджень отримано наступне.

1. Запропонована методика габаритного розрахунку зум-афокальної трикомпонентної оптичної системи дозволяє отримувати інформацію про оптичні параметри її компонен-

тів, а також про закони їх переміщення вздовж оптичної осі, використовуючи вимоги до розмірів поля зору, допустимого він'єтування позаосьових пучків променів і габаритів системи.

2. Отримані залежності світлових діаметрів компонентів афокальної системи від діапазону зміни кутового збільшення показують реальні обмеження на зміну кутового збільшення з урахуванням обмежень щодо допустимого він'єтування позаосьових пучків променів та габаритних обмежень системи.
3. Даний алгоритм може бути використаний для автоматизації проектування афокальних систем.
4. Наступним напрямком розвитку теорії проектування та параметричного синтезу трикомпонентних зум-афокальних систем слід вважати розробку та автоматизацію аберацийного синтезу їх оптичних компонентів.

Література

- [1] К. С. Лазаренко, І. Г. Чиж, "Принципи дії та сучасні засоби оптичної далекометрії", Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, Вип. 4, с. 18-32, 2022.
- [2] Allen Mann Infrared Optics and Zoom Lenses, SPIE Publications, p. 164, 2009.
- [3] Nguen Van Luen, "Automation of the design of a telescopic zoom system", J. Opt. Technol., vol. 80, no. 12, pp. 735-737, 2013. DOI: 10.1364/JOT.80.000735.
- [4] Antonin Miks, Jiri Novak, "Paraxial analysis of four-component zoom lens with fixed distance between focal points", Applied Optics, vol. 51, no. 21, pp. 5231-5235, 2012. DOI: 10.1364/AO.51.005231
- [5] D.G. Norrie, "Refractingafocal systems in thermal imagers", Optical Engineering, vol. 25, no. 2, 1986.
- [6] Mau-Shiun Yeh, Shin-Gwo Shiue, Mao-Hong Lu, "First-order analysis of a three-lens afocal zoom system", Opt. Eng., 36(4), pp. 1249-1258, 1997.
- [7] Jinkai Zhang, Xiaobo Chen, Juntong Xi, Zhuoqi Wu "Paraxial analysis of double-sided telecentriczoom lenses with threecomponents", Applied Optics, vol. 53, no. 22, pp. 4957-4967, 2014. DOI: 10.1364/AO.53.004957
- [8] Artur Hoegel, Johannes Winterot, "Afocal Zoom Lenses and their Applications", in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2012. DOI: 10.1117/12.928849
<https://www.researchgate.net/publication/258720089>
- [9] Чиж І. Г. Теорія оптичних систем: підручник. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во "Політехніка", 2022.

UDC 535.317.2

K. Lazarenko, I. Chyzh

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

THREE-COMPONENT LENS ZOOM-AFOCAL TRANSFOCAL SYSTEMS FOR THREAD RANGEFINDER

Problems. Synthesis of zoom zooms, which use zoom-afocal systems together with fixed lenses. Creation of a method of parametric synthesis of a three-component zoom-afocal system of a zoom-zoom based on the requirements for the required range of change in angular magnification, permissible cutting of peripheral beams of rays, the field of view of the system and the external location of the aperture diaphragm.

The aim of the study. Development of a method for the synthesis of a three-component zoom-afocal system suitable for computer automation.

Methodology of implementation. The theory of optical systems composed of thin components is used. Based on this theory, a system of equations is created in which the distances between the components are unknown. To ensure manufacturability, the first and third components of the system are identical. Using the formulas for angles and heights of zero rays, taking into account the requirements for permissible vignetting of beams and the angles of the zoom field of view, the necessary light diameters of the components are calculated.

Research results. The resulting formulas for the overall calculation of the zoom-afocal system allow you to take into account the requirements for the longitudinal and transverse dimensions of the system, the position of the aperture diaphragm, determine the focal lengths of the components and their relative location depending on the angular magnification over the entire range of its change. It is established that a three-component system with identical first and second components has a variable axial length, which is maximal at an angular increase of one.

Conclusions. The created method of parametric synthesis of a three-component zoom-afocal system for a zoom-zoom, in which the aperture diaphragm of a fixed lens serves as the aperture diaphragm, allows you to automate the dimensional calculation of the system and determine the laws of linear movement of its components along the optical axis.

Keywords. Zoom-zoom, zoom-afocal system, three-component zoom-afocal system.

*Надійшла до редакції
15 березня 2023 року*

*Рецензовано
08 травня 2023 року*



© 2023 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).