

DOI: 10.20535/kpi-sn.2019.3.175737

УДК 535.317.2

І.Г. Чиж*, К.С. Лісняк
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна
*corresponding author: i.g.chizh@gmail.com

ТРИКОМПОНЕНТНІ ЛІНЗОВІ ЗУМ-АФОКАЛЬНІ СИСТЕМИ ТРАНСФОКАТОРІВ

Проблематика. Параметричний синтез зум-афокальних оптичних систем для трансфокаторів. Розробка алгоритму габаритного розрахунку трикомпонентних зум-афокальних систем з урахуванням їх габаритних обмежень, забезпечення потрібного діапазону зміни кутового збільшення та поля зору трансфокатора, допустимого вин'єтування крайніх пучків променів при зміні поля зору в усьому заданому діапазоні. Синтез афокальної системи для стаціонарного об'єктива, вхідна зіниця якого знаходиться за афокальною системою.

Мета дослідження. Створення універсального аналітичного та придатного до комп'ютерної автоматизації алгоритму розрахунку оптичних і габаритних параметрів компонентів зум-афокальних трикомпонентних систем трансфокаторів.

Методика реалізації. Зум-афокальна система представляється тонкими компонентами. Складається система рівнянь, у яких відстані між компонентами є невідомими. Із рівнянь визначаються величини цих відстаней, що забезпечують потрібні значення кутового збільшення та нульову оптичну силу афокальної системи. При цьому величини оптичних сил компонентів та їх співвідношення повинні забезпечувати додатні значення відстаней між ними. За допомогою формул кутів і висот нульових променів на компонентах системи та з урахуванням допустимого вин'єтування пучка променів від краю поля зору визначаються потрібні світлові діаметри компонентів.

Результати дослідження. Отримані аналітичні залежності дають можливість за вихідними даними щодо допустимих поздовжніх і поперечних габаритів афокальної системи визначати фокусні відстані її компонентів та їх взаємне розташування на всьому діапазоні потрібної зміни кутового збільшення. Встановлено, що афокальна система має максимальну осьову довжину при кутовому збільшенні одиниця. Найбільший світловий діаметр потрібен першому компоненту. Діаметр цього компонента досягає найбільшого значення при наближенні кутового збільшення до одиниці.

Висновки. Отримані результати дають змогу в аналітичному вигляді здійснювати параметричний синтез трикомпонентних зум-афокальних систем з урахуванням вимог до їх габаритів, діапазону зміни кутового збільшення і допустимого вин'єтування пучків променів від краю поля зору.

Ключові слова: зум-афокальна система; трансфокатор; параметричний синтез зум-афокальної системи.

Вступ

Найпростішим способом перетворення стаціонарного об'єктива з фіксованою фокусною відстанню на зум-об'єктив є додавання до стаціонарного об'єктива афокальної насадки зі змінним кутовим збільшенням. Таке перетворення оптики фотокамер, відеокамер, приладів нічного бачення, тепловізорів є доцільним у випадках, коли штатний стаціонарний об'єктив не може бути замінений позаштатним панкратичним.

Зум-афокальна насадка, що перетворює штатний стаціонарний об'єктив на зум-трансфокатор, повинна забезпечувати потрібну зміну кута поля зору, збереження світлосили у заданих межах, усунення недопустимого вин'єтування пучків променів, що надходять від периферійних ділянок поля зору, збереження потрібної якості зображення по всьому полю зору. До того

ж зум-афокальна насадка повинна мати найбільш простий закон і нескладну механічну систему для переміщень її оптичних компонентів. Одночасне виконання всіх перелічених вимог є досить складною задачею, про що свідчить значна кількість публікацій, присвячених цій тематиці [1–11]. Складність задачі зростає, коли вхідна зіниця афокальної системи має бути суміщеною із віддаленою вхідною зіницею штатного об'єктива, що знаходиться поза афокальною системою. Цей фактор призводить до істотного зростання вин'єтування пучків променів, які надходять у систему від краю поля зору, особливо в режимі значного розширення поля зору штатного об'єктива. Для зменшення вин'єтування потребується істотне збільшення діаметра світлового отвору вхідного та наступного компонента афокальної системи, що супроводжується збільшенням їх відносних отворів та істотним зростанням їх аберацій. виправлення аберацій

потребує ускладнення структури вказаних компонентів, а це викликає зростання габаритно-вагових параметрів та собівартості афокальної системи.

Очевидною є потреба пошуку умов, що сприяють зменшенню відносних отворів вхідних компонентів. Така задача має бути розв'язаною ще на стадії ескізного проектування зум-афокальної насадки, а саме на етапах її структурного синтезу та габаритного розрахунку.

Постановка задачі

Задачею роботи є створення алгоритму габаритного розрахунку трикомпонентних лінзових зум-афокальних оптичних систем з винесеною за їх межі вихідною зіницею, який дає змогу задовольняти вимоги до її зовнішніх параметрів і отримувати габаритні параметри компонентів, що сприяють позитивним результатам проведення подальшого абераційного синтезу системи.

Розрахунок поздовжніх габаритних параметрів трикомпонентної зум-афокальної оптичної системи

Зум-афокальні оптичні системи мають забезпечувати плавну зміну кутового збільшення γ_{var} у діапазоні від γ до γ^{-1} , де γ – одне з двох крайніх значень γ_{var} . Це дає можливість мати γ^2 – кратність зміни кутового розміру поля зору оптичного приладу, оснащеного стаціонарним об'єктивом із зум-афокальною насадкою. На рис. 1 у тонких компонентах показана оптична система трикомпонентної афокальної системи, яка при вказаному на рисунку симетричному розміщенні компонентів забезпечує проміжне значення кутового збільшення $\gamma = 1$.

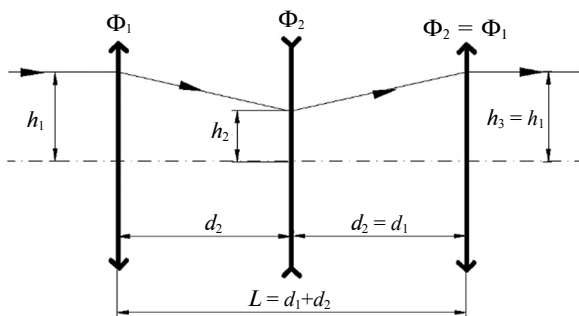


Рис. 1. Зум-афокальна симетрична система при кутовому збільшенні $\gamma = 1$

При цьому прилад зі стаціонарним об'єктивом і показаною на рис. 1 афокальною системою має зображення і кутовий розмір поля зору 2ω , який він має без афокальної насадки. Те, що $\Phi_1 = \Phi_3$, а $d_1 = d_2$ – означає симетричність системи, при цьому висота нульового променя $h_3 = h_1$. Якщо система є афокальною, то її оптична сила $\Phi = 0$. Згідно з [13], оптична сила багатокомпонентної оптичної системи визначається як

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

Оскільки нульовий промінь заходить у систему паралельно оптичній осі, то висота становить

$$h_2 = h_1(1 - d_1\Phi_1).$$

Після підстановки висот h_1, h_2, h_3 в (1) отримуємо рівняння

$$2\Phi_1 + \Phi_2 - d_1\Phi_1\Phi_2 = 0,$$

з якого

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

де f_1' – фокусна відстань крайніх компонентів, а f_2' – фокусна відстань середнього компонента. Осьова довжина L афокальної системи при цьому становить

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

Вираз (2) показує, що значення $\gamma = 1$ можна отримати за будь-якого співвідношення $k = \frac{f_1'}{f_2'} = \frac{\Phi_2}{\Phi_1}$, але для зменшення осьової довжини L фокусні відстані f_1', f_2' повинні мати протилежні знаки. Так, при $f_1' = -2f_2'$ ($k = -2$) афокальна система, згідно з (2), теоретично отримує мінімальну нульову осьову довжину. Тому в подальшому будемо аналізувати афокальні трикомпонентні системи з протилежними значеннями фокусних відстаней f_1', f_2' , тобто за від'ємних значень коефіцієнта k .

Для досягнення більших значень γ другий компонент переміщується вправо, як показано на рис. 2, а для менших значень γ середній компонент повинен переміщуватися від центра вліво. При зміні відстаней d_1, d_2 потрібно, щоб

зберігалася телескопічність системи з прямим зображенням – система галілеєвського типу. Перший компонент у такій системі буде виконувати функцію об'єктива, а другий і третій компоненти разом – функцію окуляра вказаної телескопічної системи.

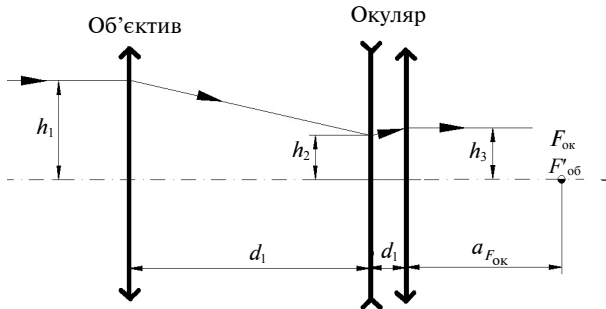


Рис. 2. Зум-афокальна система при кутовому збільшенні $\gamma > 1$

При цьому оптична сила об'єктива $\Phi_{об} = \Phi_1$, а оптична сила окуляра $\Phi_{ок} = \Phi_2 + \Phi_3 - d_2\Phi_2\Phi_3$. Оскільки $\Phi_3 = \Phi_1$, то $\Phi_{ок} = \Phi_2 + \Phi_1 - d_2\Phi_2\Phi_1$.

Тоді 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 осьова відстань

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

Вираз (3) показує, що при $\Phi_2 < 0$ і $d_2 > 0$ чисельник $1 + k + \gamma < 0$, а коефіцієнт $k < -(1 + \gamma)$. Так, наприклад, при потрібному максимальному значенні $\gamma = 3$ коефіцієнт k може набувати тільки значення $k < -4$.

Для забезпечення афокальності системі вигляду, характерного для телескопічної системи Галілея, потрібно, щоб дійсний задній фокус об'єктива був суміщеним з уявним переднім фокусом окуляра, який знаходиться за окуляром. Ця умова виконується, коли

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

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

Згідно з [13] та при $\Phi_3 = \Phi_1$ $a_{F_{ок}} = f_{ок}(1 - d_2\Phi_3) = f_{ок}(1 - d_2\Phi_1)$, а $f_{ок} = -\Phi_{ок}^{-1} = -(\Phi_1 + \Phi_2 - d_2\Phi_1\Phi_2)^{-1}$, звідки $a_{F_{ок}} = -\frac{1 - d_2\Phi_1}{\Phi_1 + \Phi_2 - d_2\Phi_1\Phi_2}$.

Після підстановки виразу $a_{F_{ок}}$ у рівняння (4) і відповідних перетворень отримуємо формулу

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

При цьому загальна осьова довжина зум-афокальної системи з виразів (3) та (5)

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

Вираз (6) свідчить про те, що осьова довжина такої системи не є сталою при зміні значень γ та k . Вона прямо пропорційна коефіцієнту k , але нелінійно залежить від значення γ . При $\gamma = 1$ функція $L(\gamma)$ набуває максимального значення:

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

Отриманий вираз дає можливість при габаритному розрахунку зум-афокальної системи визначати потрібні значення Φ_2 і Φ_1 , або f'_2 і f'_1 , якщо у вихідних даних на проектування такої системи вказані допустиме значення L_{max} і граничне максимальне значення γ . При цьому коефіцієнт k повинен задовольняти вказану вище умову $k < -(1 + \gamma)$.

Характер зміни кожного з відрізків d_1 , d_2 та їх суми при варіації значення γ показано графіками на рис. 3, на якому максимальне значення $L(\gamma)$ нормовано до одиниці, а значення γ змінюється в інтервалі від 3^{-1} до 3, забезпечуючи 9-кратну зміну поля зору трансфокатора з даною зум-афокальною насадкою. Графіки на рис. 3 показують, що відстань d_2 між середнім та останнім компонентами лінійно пов'язана зі значенням γ . Тому для переміщення середнього компонента вздовж оптичної осі потребується найпростіший лінійний механізм. Проте залежність $d_1(\gamma)$ явно нелінійна, а тому для першого компонента потребується більш складний

механізм переміщень. Характерним є і той факт, що на краях діапазону зміни γ осьова довжина зум-афокальної системи має мінімальне значення. До того ж має місце рівняння $L(\gamma) = L(\gamma^{-1})$, що свідчить про віртуальний поворот афокальної системи на 180° .

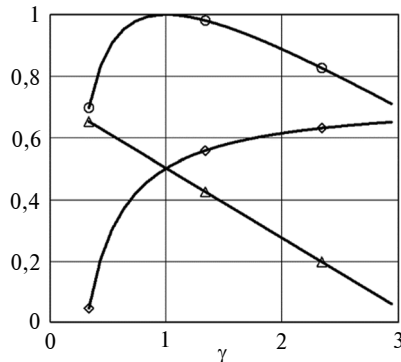


Рис. 3. Нормовані графіки залежності взаємного положення компонентів та осової довжини зум-афокальної системи від зміни значень кутового збільшення γ : $\diamond\diamond\diamond - d_1(\gamma)$, $\triangle\triangle\triangle - d_2(\gamma)$, $\circ\circ\circ - L(\gamma)$

Розрахунок поперечних габаритних параметрів трикомпонентної зум-афокальної оптичної системи

При габаритному розрахунку оптичної системи зум-афокальної насадки, крім поздовжніх відрізків, потрібно визначати світлові діаметри її компонентів, які суттєво впливають на розміри поля зору та обмеження потоків випромінювання, які надходять у стаціонарний об'єктив. Що стосується поля зору, то в телескопічній системі Галілея не може бути польової діафрагми, а тому воно обмежується тільки він'єтувальними діафрагмами. Такими діафрагмами є оправи лінзових компонентів зум-афокальної системи.

Він'єтувальні діафрагми не повинні обмежувати поле зору стаціонарного об'єктива, з яким афокальна насадка утворює трансфокатор. На потрібні розміри цих діафрагм також впливає той фактор, що апертурною діафрагмою трансфокатора є апертурна діафрагма стаціонарного об'єктива. Вхідна зіниця цього об'єктива знаходиться за зум-афокальною насадкою, як показано на рис. 4, що призводить до збільшення світлових діаметрів компонентів насадки. Задачею розрахунку поперечних габаритів компонентів зум-афокальної насадки є збереження розмірів поля зору 2ω стаціонарного об'єктива в усьому заданому діапазоні значень

γ при забезпеченні допустимого він'єтування пучків променів, що надходять у систему від країв поля зору.

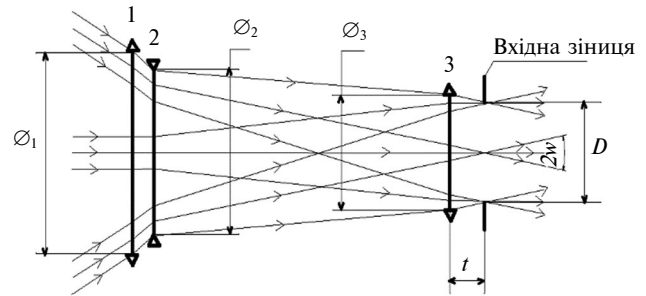


Рис. 4. До габаритного розрахунку світлових діаметрів ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3

Для розрахунку світлових діаметрів ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 компонентів афокальної системи потрібні додаткові дані про: 2ω – кут поля зору стаціонарного об'єктива, D – діаметр вхідної зіниці стаціонарного об'єктива, t – відрізок, показаний на рис. 4, що вказує на розміщення вхідної зіниці відносно останнього компонента афокальної системи, та k_ω – допустиме значення коефіцієнта він'єтування пучка променів, що надходить у афокальну систему від краю поля зору.

Розрахунок вказаних світлових діаметрів можна здійснити за допомогою формул висот і кутів нульового променя [12], який вибирається відповідно до вказаного значення k_ω . Якщо потрібно мати $k_\omega = 1$, то необхідно розрахувати висоти на компонентах променя, що надходить у афокальну систему через верхній край отвору першого компонента (див. рис. 4) і належить верхньому крайньому нахиленому пучку. Подвоєні значення висот такого променя на всіх компонентах афокальної системи дорівнюють їх світловим діаметрам. Нижче наведені формули розрахунку діаметрів ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 , отримані в такий спосіб при $k_\omega = 1$:

$$\phi_1 = 2[bt - d_1 - d_2 + d_1 d_2 \Phi_2] \operatorname{tg} \omega + bD; \quad (7)$$

$$\phi_2 = 2(ta - d_2) \operatorname{tg} \omega + aD; \quad (8)$$

$$\phi_3 = 2t \operatorname{tg} \omega + D, \quad (9)$$

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

Якщо необхідно розрахувати світлові діаметри компонентів за допустимого значення коефіцієнта він'єтування $k_\omega = 0,5$, то достатньо здійснити розрахунок ходу променя, який є середнім у

пучку, що надходить через край першого компонента і проходить через осьову точку вхідної зіниці (див. рис. 4). За вказаного значення k_0 такий розрахунок можна здійснити за формулами (7), (8), в які підставляється значення $D = 0$ і які перетворюються до вигляду:

$$\varnothing_1 = 2[bt - d_1 - d_2 + d_1 d_2 \Phi_2] \text{tg} \omega ;$$

$$\varnothing_2 = 2(ta - d_2) \text{tg} \omega ;$$

$$\varnothing_3 = 2t \text{tg} \omega .$$

На рис. 5, 6 як приклад показано графіки функцій $\varnothing_1(\gamma)$, $\varnothing_2(\gamma)$, $\varnothing_3(\gamma)$, отримані за формулами (7)–(9), для зум-афокальної системи з максимальною осьовою довжиною $L_{\text{max}} = 100$ мм, $\gamma \in [0,333...3]$, $k = -4,2$, $t = 10$ мм, $D = 20$ мм.

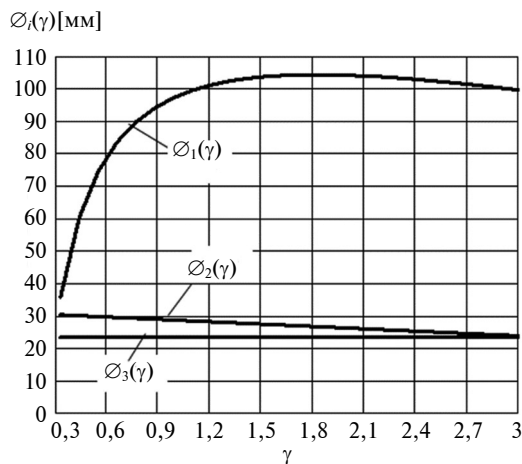


Рис. 5. Графіки функцій $\varnothing_1(\gamma)$, $\varnothing_2(\gamma)$, $\varnothing_3(\gamma)$ при $k_0 = 1$

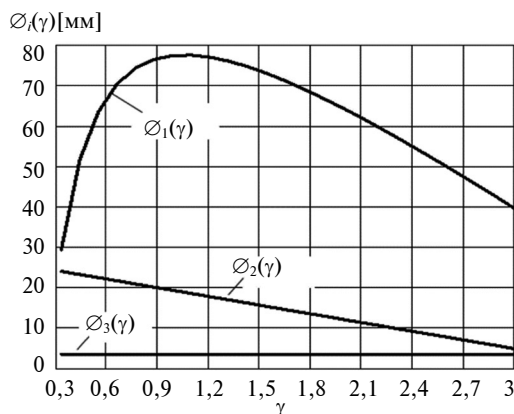


Рис. 6. Графіки функцій $\varnothing_1(\gamma)$, $\varnothing_2(\gamma)$, $\varnothing_3(\gamma)$ при $k_0 = 0,5$

Наведені на рис. 5 графіки дають уявлення про розміри світлових діаметрів компонентів, при яких вин'єтування відсутнє на всьому заданому діапазоні зміни кутового збільшення γ . Графіки на рис. 6 також демонструють потрібні світлові діаметри компонентів за допустимого значення $k_0 = 0,5$.

Зрозуміло, що при визначенні діаметрів компонентів за цими графіками потрібно вибирати ті їх розміри, які в робочому діапазоні значень γ є найбільшими. Так, згідно з графіками на рис. 5, при $k_0 = 1$ перший компонент повинен мати світловий діаметр 105 мм, другий – 30,5 мм, третій – 23,5 мм. Згідно з графіками на рис. 6 при $k_0 = 0,5$ перший компонент повинен мати світловий діаметр не менше 78 мм, другий – 24 мм, третій – 3,5 мм.

Графіки на рис. 5 і 6 за необхідності дають змогу обмежити діапазон зміни кутового збільшення або виключити із практичного застосування окремі ділянки цього діапазону, якщо поперечні габарити першого компонента на цих ділянках виходять за допустимі значення.

Висновки

Запропонований алгоритм габаритного розрахунку зум-афокальної трикомпонентної оптичної системи дає можливість отримувати дані про оптичні параметри її компонентів, закон їх переміщень уздовж оптичної осі, використовуючи вимоги до зовнішніх габаритів зум-афокальної трикомпонентної системи, потрібного діапазону зміни її кутового збільшення та розмірів поля зору.

Знайдені залежності світлових діаметрів компонентів афокальної системи від діапазону зміни кутового збільшення надають можливість встановлювати реальні межі зміни кутового збільшення з урахуванням вимог до допустимого вин'єтування позаосьових пучків променів та обмежень на габарити системи.

Алгоритм габаритного розрахунку дає змогу в подальшому реалізувати комп'ютеризовану автоматизацію проектування афокальної системи.

Наступним напрямом розвитку теорії проектування зум-афокальних систем слід вважати розробку алгоритму абераційного синтезу компонентів вказаних систем.

References

- [1] V.N. Churilovsky, *Theory of Optical Devices*. Leningrad, SU: Mechanical Engineering, 1966.
- [2] E.O. Ulyanova, "Optical system with two fields of view for thermal imaging devices based on matrix photodetectors", *Appl. Phys.*, no. 3, pp. 91–94, 2012.
- [3] Mau-Shiun *et al.*, "First-order analysis of a three-lens afocal zoom System", *Optical Eng.*, vol. 36, no. 4, pp. 1249–1258, 1997. doi: 10.1117/1.601245
- [4] D.G. Norrie, "Refracting afocal systems in thermal imagers", *Optical Eng.*, vol. 25, no. 2, pp. 888–893, 1986. doi: 10.1117/12.7972630
- [5] J. Zhang *et al.*, "Paraxial analysis of double-sided telecentric zoom lenses with three components", *Appl. Optics*, vol. 53, no. 22, pp. 4957–4967, 2014. doi: 10.1364/ao.53.004957
- [6] V.G. Pospekhov *et al.*, "Investigations in the field of calculation of a constant-length pancritical lens for a digital camera", *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie*, no. 4, pp. 27–38, 2010.
- [7] N. van Luyen, "Automation of the design of a pancreatic telescopic system", *Optical J.*, vol. 80, no. 12, pp. 22–25, 2013.
- [8] Miks and J. Novak, "Paraxial analysis of four-component zoom lens with fixed distance between focal points", *Appl. Optics*, vol. 51, no. 21, pp. 5231–5235, 2012. doi: 10.1364/ao.51.005231
- [9] I.I. Pakhomov *et al.*, "Automated dimensional calculation of zoom lenses", *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie*, no. 3, pp. 26–41, 2010.
- [10] S.V. Oleinik and T.N. Khatsevich, "A method for constructing the optical system with a discrete change in focal length", *Izvestiia Vuzov. Priborostroenie*, no. 6, pp. 58–62, 2009.
- [11] Mann, *Infrared Optics and Zoom Lenses*. SPIE Press, 2009.
- [12] Hoegele. *Afocal Zoom Lenses and Their Applications* [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/258720089>
- [13] B.N. Begunov *et al.*, *Theory of Optical Systems*. Leningrad, SU: Mechanical Engineering, 1981.

И.Г. Чиж, К.С. Лисняк

ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЕ ЛИНЗОВЫЕ ЗУМ-АФОКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ТРАНСФОКАТОРОВ

Проблематика. Параметрический синтез зум-афокальных оптических систем для трансфокаторов. Разработка алгоритма габаритного расчета трехкомпонентных зум-афокальных систем с учетом габаритных ограничений, обеспечения нужного диапазона изменения углового увеличения и поля зрения трансфокатора, допустимого виньетирования крайних пучков лучей при изменении поля зрения во всем заданном диапазоне. Синтез афокальной системы для стационарного объектива, входной зрачок которого находится за афокальной системой.

Цель исследования. Создание универсального аналитического и пригодного для компьютерной автоматизации алгоритма расчета оптических и габаритных параметров компонентов зум-афокальных трехкомпонентных систем трансфокаторов.

Методика реализации. Зум-афокальная система представляется тонкими компонентами. Составляется система уравнений, в которых расстояния между компонентами являются неизвестными. Из уравнений восстанавливаются величины этих расстояний, которые обеспечивают нужные значения углового увеличения и нулевую оптическую силу афокальной системы. При этом величины оптических сил компонентов и их соотношения должны обеспечивать положительные значения расстояний между ними. С помощью формул углов и высот нулевых лучей на компонентах системы с учетом допустимого виньетирования пучка лучей от края поля зрения определяются нужные световые диаметры компонентов.

Результаты исследования. Полученные аналитические зависимости позволяют определять фокусные расстояния компонентов афокальной системы и их взаимное расположение на всем нужном диапазоне изменения углового увеличения, используя исходные данные на допустимые продольные и поперечные габариты такой системы. Показано, что афокальные системы имеют максимальную осевую длину при угловом увеличении единица. Наибольший световой диаметр имеет первый компонент. Диаметр этого компонента достигает наибольшего значения при приближении значения углового увеличения к единице.

Выводы. Полученные результаты позволяют в аналитическом виде осуществлять параметрический синтез трехкомпонентных зум-афокальных систем с учетом требований к их габаритам, диапазону изменения углового увеличения и допустимому виньетированию пучков лучей от края поля зрения.

Ключевые слова: зум-афокальная система; трансфокатор; параметрический синтез зум-афокальных систем.

I.G. Chyzh, K.S. Lysnyak

THREE-COMPONENT LENS ZOOM-AFOCAL SYSTEMS FOR TRANSFOCATORS

Background. Parametric synthesis of zoom-afocal optical systems for zoom lenses. Development of an algorithm for dimensional calculation of three-component zoom-afocal systems when accounting overall limitations, providing the desired range of changes in the angular magnification and field of view of the zoom lens, the allowable vignetting of the extreme beams of light when the field of view changes over the entire specified range. Synthesis of an afocal system for a stationary lens, the entrance pupil of which is located behind the afocal system.

Objective. The purpose of the paper is to create a universal analytical and suitable for computer automation algorithm for calculation of the optical and overall parameters of the components of zoom-local three-component zoom systems.

Methods. The zoom-afocal system is represented by subtle components. A system of equations is compiled in which the distances between the components are unknown. From the equations, the values of these distances are recovered, which provide the necessary values of the angular magnification and zero optical power of the afocal system. In this case, the magnitudes of the optical powers of the components and their ratios should ensure positive values of the distances between them. Using the formulae of the angles and heights of the zero rays on the components of the system, taking into account the permissible vignetting of the beam of rays from the edge of the field of view, the required light diameters of the components are determined.

Results. The obtained analytical dependences allow us to determine the focal distances of the afocal system components and their mutual location over the entire required range of changes in the angular magnification using the original data on the allowable longitudinal and transverse dimensions of the afocal system. It is shown that afocal systems have a maximum axial length with the angular increase of one. The largest light diameter has the first component. The diameter of this component reaches its greatest value as the value of the angular increase is close to one.

Conclusions. The obtained results allow analytically performing parametric synthesis of three-component zoom-afocal systems, taking into account the requirements for their dimensions, the range of changes in the angular magnification and permissible vignetting of beams of rays from the edge of the visual field.

Keywords: zoom-afocal system; zoom lens; parametric synthesis of zoom-afocal systems.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
16 травня 2019 року

Прийнята до публікації
20 червня 2019 року