

DOI: 10.20535/kpi-sn.2019.5-6.188314

УДК 535.317.2

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

ЧОТИРИКОМПОНЕНТНІ ЛІНЗОВІ ЗУМ-АФОКАЛЬНІ СИСТЕМИ

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

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

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

Результати дослідження. Отримано аналітичні залежності, які дають можливість за вихідними даними визначати оптичні сили компонентів та їх взаємне розміщення на всьому діапазоні потрібної зміни кутового збільшення. Показано, що перший компонент має найбільший світловий діаметр, який досягає найбільшого значення при наближенні до максимального значення кутового збільшення в заданому діапазоні.

Висновки. Отримані результати дають змогу в аналітичному вигляді здійснювати параметричний синтез чотирикомпонентних 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: лінзова зум-афокальна система; трансфокатор; параметричний синтез зум-афокальної системи.

Вступ

У попередній роботі авторів [1] викладено результати досліджень геометричних параметрів і функціональних характеристик трикомпонентних зум-афокальних систем, які використовуються у трансфокаторах. Показано, що їх осьова довжина є функцією кутового збільшення γ і досягає максимуму при $\gamma = 1$. Залежність осової довжини трикомпонентної системи від значення γ слід вважати недоліком, що породжує потребу в наявності додаткового механізму пересування першого компонента системи та призводить до зростання складності конструкції афокальної насадки.

Ще одним істотним недоліком трикомпонентної системи є великі значення відносних отворів першого та другого компонентів, особливо у випадку розміщення апертурної діафрагми за афокальною системою. Таке розміщення апертурної діафрагми є характерним при ви-

користанні афокальної системи в складі трансфокатора зі сталим об'єктивом. Великі значення відносних отворів компонентів призводять до більших аберацій і, як наслідок, до ускладнення їх оптичної структури через потребу корекції аберацій.

У праці [2] наведені результати синтезу чотирикомпонентної зум-афокальної системи, яка, на відміну від трикомпонентної, може мати незмінну осьову довжину завдяки нерухомості першого та останнього компонентів. Однак досліджені в [2] та в інших роботах [3–13] чотирикомпонентні зум-афокальні оптичні системи мають апертурну діафрагму всередині системи, що сприяє зменшенню відносних отворів їх компонентів і створює більш сприятливі умови для корекції аберацій. Тому результати таких досліджень не можна переносити на афокальні системи з винесеною за їх межі апертурною діафрагмою. Цим обумовлюється потреба у проведеному дослідженні габаритних параметрів чотирикомпонентних зум-афокальних систем із

зовнішнім розміщенням апертурної діафрагми. До того ж результати таких досліджень дадуть можливість порівняти габаритні параметри чотири- та трикомпонентних афокальних систем з метою виявлення їх переваг і недоліків. Головна мета наших досліджень – розробка теоретичної основи ескізного проектування чотирикомпонентних систем.

Постановка задачі

Задача полягає у пошуку залежності оптичних сил компонентів, взаємного розміщення компонентів уздовж оптичної осі та світлових діаметрів компонентів за таких заданих параметрів: а) діапазон кутового збільшення чотирикомпонентної зум-афокальної системи, б) осьова довжина зум-афокальної системи, в) діаметр апертурної діафрагми та її розміщення; г) кут поля зору стаціонарного об’єктива.

Аналіз параметрів чотирикомпонентної зум-афокальної оптичної системи

На рис. 1 у тонких компонентах показана чотирикомпонентна афокальна оптична система, яка при вказаному на рисунку симетричному розміщенні компонентів забезпечує проміжне значення кутового збільшення $\gamma = 1$. Функцію апертурної діафрагми такої системи виконує вхідна зіниця об’єктива, що входить до складу трансфокатора.

Показана на рис. 1 афокальна система на вході та на виході має кут поля зору 2ω , рівний куту поля зору об’єктива. Симетричність системи означає, що оптичні сили компонентів та осьові відрізки на рис. 1 знаходяться у спів-

відношеннях: $\Phi_1 = \Phi_4$, $\Phi_2 = \Phi_3$, $d_1^* = d_3^*$. У стані, показаному на рис. 1, компоненти 1 і 2, а також 3 і 4 утворюють однакові телескопічні системи, повернуті одна до одної на 180° .

Телескопічній системі, складеній із компонентів 1 і 2, відповідає рівняння

$$f_1' + f_2' = \frac{1}{\Phi_1} + \frac{1}{\Phi_2} = d_1^* = \frac{L - d_2^*}{2},$$

де f_1' , f_2' – задні фокусні відстані компонентів 1 і 2 відповідно, Φ_1 , Φ_2 – оптичні сили тих самих компонентів.

Якщо оптичні сили вказаних компонентів співвідносяться як $\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = k$, то в такому випадку

$$\Phi_1 = \frac{k + 1}{k} \frac{2}{L - d_2^*} = \frac{2(k + 1)}{k(L - d_2^*)}, \quad (1)$$

$$\Phi_2 = k\Phi_1 = \frac{2(k + 1)}{L - d_2^*}. \quad (2)$$

За значень кутового збільшення $\gamma \neq 1$ оптична система має інше розміщення компонентів, яке для прикладу показано на рис. 2.

Для набуття афокальною системою при $\gamma \neq 1$ властивостей телескопічної системи галілеєвського типу, що забезпечує потрібне пряме зображення, слід виконати такі умови:

1) перша група компонентів, наприклад із компонентів 1 і 2, утворює об’єктив телескопічної системи, а інша, друга, група із компонентів 3 і 4 утворює окуляр із протилежною за знаком оптичною силою;

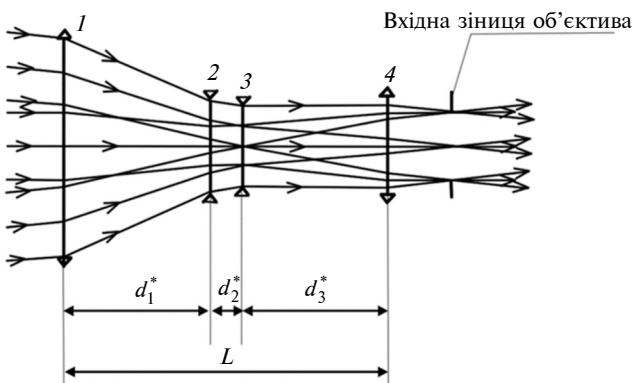


Рис. 1. Чотирикомпонентна зум-афокальна оптична система при кутовому збільшенні $\gamma = 1$

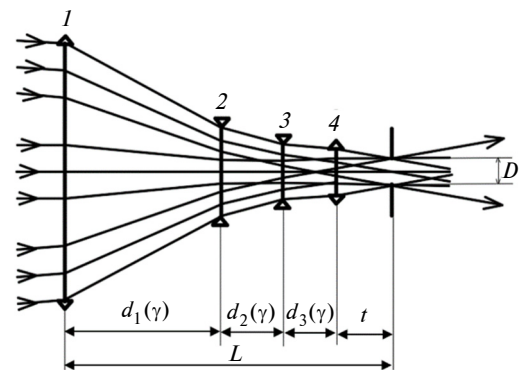


Рис. 2. Чотирикомпонентна зум-афокальна система при $\gamma \neq 1$

2) задній фокус $F'_{об}$ об'єктива повинен бути суміщеним із переднім фокусом $F_{ок}$ окуляра;

3) відношення задньої фокусної відстані об'єктива до задньої фокусної відстані окуляра, що вказані в п. 1 і 2, є заданим кутовим збільшенням γ афокальної системи.

Згідно з умовою 1 оптична сила об'єктива становить $\Phi_{об} = \Phi_1 + \Phi_2 - d_1\Phi_1\Phi_2$, а оптична сила окуляра $\Phi_{ок} = \Phi_3 + \Phi_4 - d_3\Phi_3\Phi_4 = \Phi_2 + \Phi_1 - d_3\Phi_2\Phi_1$, при цьому умова 3 має математичний вираз

$$\frac{f'_{об}}{f'_{ок}} = \frac{\Phi_{ок}}{\Phi_{об}} = \frac{\Phi_1 + \Phi_2 - d_3\Phi_1\Phi_2}{\Phi_1 + \Phi_2 - d_1\Phi_1\Phi_2} = -\gamma,$$

який з урахуванням того, що $\Phi_2 = k\Phi_1$ і $d_3 = L - d_1 - d_2$, набуває вигляду

$$1 + k - (L - d_1 - d_2)k\Phi_1 = -\gamma(1 + k - d_1k\Phi_1). \quad (3)$$

Для виконання умови 2 потрібно, щоб фокальні відрізки об'єктива $a'_{F'_{об}}$ та окуляра $a_{F_{ок}}$ і відстань d_2 співвідносилися як

$$a'_{F'_{об}} = d_2 + a_{F_{ок}}. \quad (4)$$

Фокальні відрізки $a'_{F'_{об}}$, $a_{F_{ок}}$ двокомпонентних систем розраховуються за відомими формулами [14]:

$$a'_{F'_{об}} = f'_{об}(1 - \Phi_1d_1) = \frac{1 - \Phi_1d_1}{\Phi_1(1 + k - d_1k\Phi_1)},$$

$$a_{F_{ок}} = f_{ок}(1 - \Phi_4d_3) = \frac{1 - \Phi_1d_3}{-\Phi_1(1 + k - d_3k\Phi_1)}.$$

Після підстановки останніх виразів у (4) та враховуючи, що $d_3 = L - d_1 - d_2$, отримуємо

$$d_2\Phi_1 = \frac{1 - \Phi_1d_1}{(1 + k - d_1k\Phi_1)} + \frac{1 - \Phi_1(L - d_1 - d_2)}{1 + k - (L - d_1 - d_2)k\Phi_1}. \quad (5)$$

Вирази (3) і (5) утворюють систему рівнянь, у якій відстані d_1 і d_2 є невідомими. Розв'язання цієї системи рівнянь за заданих величин L і k показує, що відстань $d_3 = L - d_1 - d_2$, яка не може мати від'ємних значень, обмежує можливий діапазон кутового збільшення γ зум'яфокальної системи. На рис. 3 для прикладу показані графіки залежності відстані $d_3(\gamma, k)$,

отримані при $d_2^* = 10$ мм і $L = 100$ мм для двох значень k , які демонструють максимально можливі значення γ у той момент, коли d_3 досягає нульового значення. Так, при $k = -1,5$ $\gamma_{max} = 2,2$, а при $k = -2,5$ $\gamma_{max} = 6,4$.

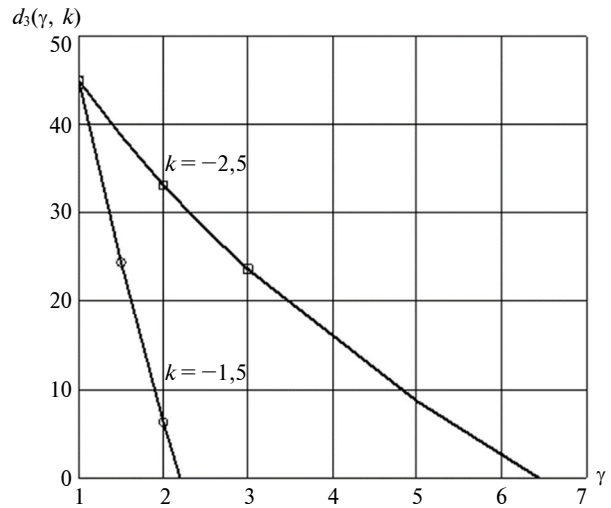


Рис. 3. Графіки залежності відстані між компонентами 3 і 4 від кутового збільшення γ і коефіцієнта k

Для пошуку виразу, який дає змогу визначити γ_{max} за заданих значень k , використаємо рівняння (3) за умови, що $d_3 = L - d_1 - d_2 = 0$. Тоді

$$\gamma_{max} = -\frac{1 + k}{1 + k - d_1k\Phi_1}. \quad (6)$$

У формулі (6) невідомою є величина d_1 , яку можна знайти із розв'язання рівняння (5) після підстановки в нього $\Phi_1 = \frac{2(k+1)}{k(L-d_2^*)}$ і $d_3 = L - d_1 - d_2 = 0$, з чого $d_2 = L - d_1$. У результаті отримаємо рівняння відносно невідомої величини d_1 :

$$ad_1^2 + bd_1 + c = 0, \quad (7)$$

де

$$a = (1 + k)k\Phi_1^2,$$

$$b = \{2k + 1 - (1 + k)[k\Phi_1L + (1 + k)]\}\Phi_1,$$

$$c = L\Phi_1(1 + k)^2 - 2(1 + k).$$

Прийнятним коренем рівняння (7) є

$$d_1 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (8)$$

На рис. 4 для прикладу показані графіки функції $\gamma_{\max}(k)$, розраховані з використанням формул (6)–(8) при $L = 100$ мм і двох значеннях d_2^* .

Ці графіки дають можливість знаходити значення коефіцієнта k , виходячи з потрібного значення γ_{\max} . Так, наприклад, для забезпечення $\gamma_{\max} = 3$ при $d_2^* = 10$ мм необхідно мати $k = -1,75$. Значення цього коефіцієнта своєю чергою дає можливість за допомогою формул (1) і (2) розрахувати оптичні сили і фокусні відстані компонентів зум-афокальної системи, а потім на цій основі, використовуючи систему рівнянь, складену із виразів (3) і (5), знайти функції $d_1(\gamma)$, $d_2(\gamma)$ і $d_3(\gamma) = L - d_1(\gamma) - d_2(\gamma)$ у діапазоні γ від γ_{\max}^{-1} до γ_{\max} .

На рис. 5 зображені графіки функцій $d_1(\gamma)$, $d_2(\gamma)$, $d_3(\gamma)$, отримані у вказаний вище спосіб для діапазону $\gamma \in [0,333 - 3]$ при $k = -1,75$.

Наведені на рис. 5 графіки свідчать про те, що в діапазоні $\gamma \in [1...3]$ відносно найбільша нелінійність спостерігається у функції $d_1(\gamma)$, а функції $d_2(\gamma)$ та $d_3(\gamma)$ майже лінійні, що спрощує виготовлення і функціонування механізму переміщень цих компонентів. Найбільша нелінійність вказаних функцій спостерігається на ділянці $\gamma \in [0,333...1]$, яка може бути необов'язковою для використання.

Отримані результати дають можливість визначати світлові діаметри компонентів зум-афокальної системи у всьому заданому діапазоні кутового збільшення γ . Для цього достатньо скористатися формулами кутів і висот нульового променя, який проходить через всю афокальну систему і виходить із неї через край вихідної зіниці (або апертурної діафрагми) під кутом ω – половини кутового поля зору стаціонарного об'єктива. Подвійні висоти такого променя дорівнюють світловим діаметрам компонентів, за яких забезпечується відсутність віньєтування променів по всьому заданому полю зору 2ω .

Незалежним від кутового збільшення при цьому є лише світловий діаметр останнього четвертого компонента:

$$\varnothing_4 = D + 2t \cdot \text{tg}(\omega), \quad (9)$$

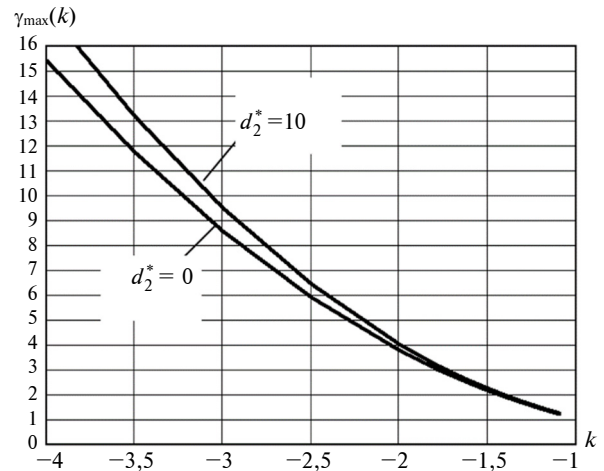


Рис. 4. Графіки залежності максимального значення кутового збільшення від коефіцієнта k

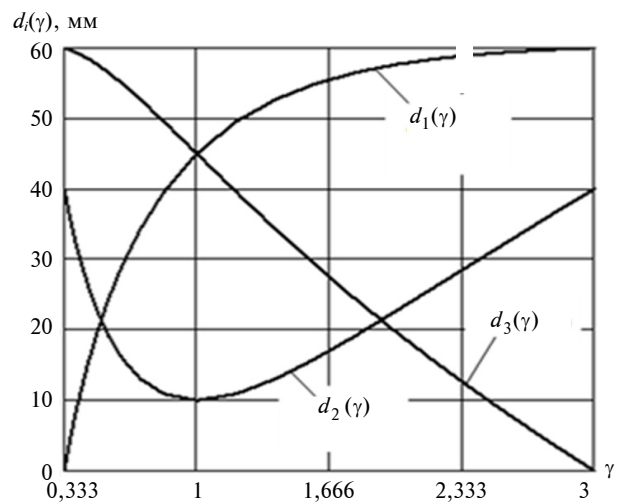


Рис. 5. Графіки відстаней між компонентами як функції кутового збільшення γ зум-афокальної системи при $L = 100$ мм і $d_2^* = 10$ мм

де параметр D – діаметр вихідної зіниці (апертурної діафрагми), t – відрізок, що вказує на положення вихідної зіниці відносно четвертого компонента (див. рис. 2). Світлові діаметри інших компонентів розраховуються за формулами:

$$\varnothing_3(\gamma) = \varnothing_4 - 2d_3(\gamma)[\text{tg}(\omega) + 0,5\varnothing_4\Phi_1], \quad (10)$$

$$\varnothing_2(\gamma) = \varnothing_3(\gamma) - 2d_2(\gamma)[\text{tg}(\omega) + 0,5(\varnothing_4\Phi_1 + \varnothing_3(\gamma)\Phi_2)], \quad (11)$$

$$\varnothing_1(\gamma) = \varnothing_2(\gamma) - 2d_1(\gamma)[\text{tg}(\omega) + 0,5(\varnothing_4\Phi_1 + \varnothing_3(\gamma)\Phi_2 + \varnothing_2(\gamma)\Phi_2)]. \quad (12)$$

Формули (9)–(12) також дають змогу розрахувати світлові діаметри компонентів за допустимого коефіцієнта віньєтування крайнього пучка променів $k_{\omega} = 0,5$. Для цього розрахунки за вказаними формулами потрібно здійснити при $D = 0$.

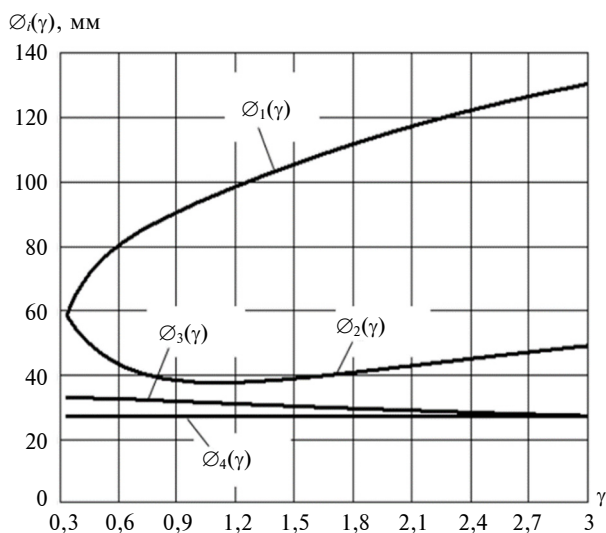


Рис. 6. Графіки залежності світлових діаметрів компонентів від кутового збільшення γ зум-афокальної системи при $L = 100$ мм, $f_1' = f_4' = 105$ мм, $f_2' = f_3' = -60$ мм, $D = 20$ мм, $2\omega = 20^\circ$, $t = 20$ мм, $k = -1,75$, $d_2^* = 10$ мм

З наведених на рис. 6 графіків видно, що найбільшого світлового діаметра потребує перший компонент при $\gamma = 3$. Але діаметр цього компонента, наприклад, за допустимого значення $k_{\omega} = 0,5$ зменшується майже у два рази і становить 60 мм.

Графіки на рис. 6 й аналогічні графіки на рис. 5 у праці [1] дають змогу зробити порівняння відносних отворів компонентів три- та чотирикомпонентної систем, які функціонують в однакових умовах. Так, за довжини системи $L = 100$ мм, $2\omega = 20^\circ$, $t = 10$ мм, $\gamma \in [1...3]$, $k_{\omega} = 1$

найбільшого значення відносного отвору досягають другий компонент трикомпонентної системи, у якого спостерігається максимальне значення $\varnothing : f' = 1,32$, і перший компонент чотирикомпонентної системи – $\varnothing : f' = 1,24$. В обох системах вказані отвори зменшуються пропорційно коефіцієнту допустимого віньєтування k_{ω} . Порівняння графіків на рис. 5 з аналогічними графіками трикомпонентної системи на рис. 3 у праці [1] показує, що чотирикомпонентній системі властива менша нелінійність функцій $d_i(\gamma)$. Це є її суттєвою перевагою.

Висновки

Запропонований метод габаритного розрахунку зум-афокальної чотирикомпонентної оптичної системи дає можливість отримувати дані про оптичні та геометричні параметри її компонентів і закони їх переміщень вздовж оптичної осі на основі вимог до потрібного діапазону зміни кутового збільшення, розмірів поля зору, діаметра та віддаленості вихідної зіниці, допустимого коефіцієнту віньєтування.

Знайдені залежності відстаней між компонентами чотирикомпонентної афокальної системи від зміни її кутового збільшення вказують на відносно меншу їх нелінійність порівняно з подібною трикомпонентною системою.

Досліджені залежності надають можливість встановлювати реальний діапазон значень кутового збільшення з урахуванням вимог до допустимого віньєтування позаосьових пучків променів та обмежень на поперечні габарити системи.

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

Подальшим напрямом розвитку теорії проектування чотирикомпонентних зум-афокальних систем із зовнішнім розміщенням вихідної зіниці слід вважати розробку алгоритму абераційного синтезу компонентів вказаних систем.

References

- [1] I.H. Chyzh and K.S. Lysnyak, "Three-component lens zoom-afocal systems for transfocators", *KPI Science News*, no. 3, pp. 73–79, 2019. doi: 10.20535/kpi-sn.2019.3.175737
- [2] A. Hoegle and J. Winterot, "Afocal zoom lenses and their applications", in *Proc. SPIE Optical Engineering + Applications*, San Diego, California, 2012. doi: 10.1117/12.928849
- [3] V.N. Churilovsky, *Theory of Optical Devices*. Leningrad, SU: Mashinostroenie, 1966, 564 p.
- [4] E.O. Ulyanova, "Optical system with two fields of view for thermal imaging devices based on the array photoreceivers", *Applied Physics*, no. 3, pp. 91–94, 2012.

- [5] M.S. Yeh *et al.*, “First-order analysis of a three-lens afocal zoom system”, *Optical Engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 1249–1258, 1997. doi: 10.1117/1.601245
- [6] D.G. Norrie, “Refracting afocal systems in thermal imagers”, *Optical Engineering*, vol. 25, no. 2, 1986.
- [7] J. Zhang *et al.*, “Paraxial analysis of double-sided telecentric zoom lenses with three components”, *Applied Optics*, vol. 53, no. 22, pp. 4957–4967, 2014. doi: 10.1364/ao.53.004957
- [8] V.G. Pospekhov *et al.*, “Studies relating to design of pancratic constant-length objective for digital photo camera”, *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, no. 4, pp. 27–38, 2010.
- [9] N. Van Luyen, “Pancratic telescopic system design automation”, *Journal of Optical Technology*, no. 12, pp. 22–25, 2013.
- [10] A. Miks and J. 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
- [11] I.I. Pakhomov *et al.*, “Automated dimensional calculation of zoom lenses”, *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, no. 3, pp. 26–41, 2010.
- [12] S.V. Oleinik and T.N. Khatsevich, “Development of an optical system with discret change of focal length”, *Journal of Instrument Engineering*, no. 6, pp. 58–62, 2009.
- [13] A. Mann, *Infrared Optics and Zoom Lenses*, 2nd ed. SPIE, 2009.
- [14] B.N. Begunov *et al.*, *Theory of Optical Systems*. Leningrad, SU: Mashinostroenie, 1981, 432 p.

И.Г. Чиж, К.С. Лисняк

ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНЫЕ ЛИНЗОВЫЕ ЗУМ-АФОКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Проблематика. Параметрический синтез зум-афокальных оптических систем для трансфокаторов. Алгоритм габаритного расчета четырехкомпонентных зум-афокальных систем, который обеспечивает габаритные ограничения, нужный диапазон изменения углового увеличения и поля зрения трансфокатора, допустимое виньетирование крайних пучков лучей во всем диапазоне углового увеличения. Синтез афокальных систем для стационарного объектива, входной зрачок которого находится за афокальной системой.

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

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

Результаты исследования. Получены аналитические зависимости, позволяющие по исходным данным определять оптические силы компонентов и их взаимное расположение во всем диапазоне нужного изменения углового увеличения. Показано, что первый компонент имеет наибольший световой диаметр, когда достигается наибольшее значение углового увеличения в заданном диапазоне.

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

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

I.H. Chyzh, K.S. Lysnyak

FOUR-COMPONENT AFOCAL LENS SYSTEMS

Background. Parametric synthesis of zoom-afocal optical systems for zoom-lens. Algorithm for the overall calculation of the four-component zoom-afocal systems, which provides overall limitations, the desired range of variation of the angular magnification and the field of view of the zoom-lens, the permissible vignetting of the beam beams in the entire range of angular magnification. Synthesis of afocal systems for a stationary lens, the entrance pupil of which is located behind the afocal system.

Objective. Development of a universal analytical algorithm suitable for computer automation for calculating the optical and overall parameters of the components of four-component zoom-afocal 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 formulas 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. Analytical dependences are obtained that allow one to determine the optical powers of the components and their relative position in the entire range of the desired change in angular magnification from the initial data. It is shown that the first component has the largest light diameter when the largest value of the angular increase in a given range is achieved.

Conclusions. The results obtained make it possible to carry out in an analytical form a parametric synthesis of four-component zoom-afocal systems, taking into account the requirements for their dimensions, field of view, the range of variation of the angular increase and the permissible vignetting of the beam of rays from the edge of the field of view.

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

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
28 вересня 2019 року

Прийнята до публікації
31 жовтня 2019 року