

УДК 535.317.2

**ЧОТИРОКОМПОНЕНТНІ 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: [karinalisnak97@gmail.com](mailto:karinalisnak97@gmail.com), [i.g.chizh@gmail.com](mailto:i.g.chizh@gmail.com)*

*Проблема, що розглядається в дослідженні, полягає в параметричному синтезі зум-афокальних оптичних систем трансфокаторів для виміральної техніки, зокрема далекомірів нитяного типу. Метою дослідження є розробка універсального аналітичного алгоритму, який може бути автоматизований комп'ютерно, для розрахунку оптичних і габаритних параметрів компонентів чотирикомпонентних лінзових зум-афокальних систем трансфокаторів.*

*Методика реалізації має уявне представлення зум-афокальної системи як послідовності тонких компонентів. За допомогою системи рівнянь, де оптичні сили компонентів і відстані між ними є невідомими, визначаються значення цих величин, які забезпечують потрібний діапазон кутового збільшення та нульову оптичну силу афокальної системи. Водночас, оптичні сили компонентів і їх відношення повинні мати додатні значення відстаней між компонентами. Розрахунок світлових діаметрів компонентів здійснюється з урахуванням допустимого він'єтування променевого пучка від краю поля зору за допомогою визначення кутів і висот нульових променів на компонентах системи.*

*Результати дослідження включають аналітичні залежності, які дозволяють визначити оптичні сили компонентів та їх взаємне розташування для всього діапазону зміни кутового збільшення на основі вихідних даних. Дослідження показало, що перший компонент має найбільший світловий діаметр, який досягає максимального значення при наближенні до максимального кутового збільшення у заданому діапазоні.*

*Отримані результати дають можливість виконувати параметричний синтез чотирикомпонентних зум-афокальних систем в аналітичній формі з урахуванням вимог до їх габаритів, діапазону зміни кутового збільшення і допустимого він'єтування променевих пучків від краю поля зору.*

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

**Вступ**

Серед багатьох типів оптичних далекомірів особливе місце займають так звані пасивні, які не опромінюють об'єкти далекометрії, що забезпечує їм маскування. В роботі [1] на основі огляду і аналізу різних типів далекомірів показано, що сучасний, пасивний, автоматизований далекомір може бути побудованим за принципом класичного нитяного. Але використання в таких далекомірах об'єктивів з фіксованою фокусною відстанню (фікс-об'єктивів) суттєво обмежує робочий діапазон приладу. Через це виникає потреба в застосуванні нитяного далекоміра, в якому замість об'єктива з фіксованою фокусною відстанню пропонується використовувати зум-трансфокатор. Зум-трансфокатор утворюється додаванням до фікс-об'єктива попереду нього зум-афокальної оптичної системи. Плавна комп'ютерно керована зміна кутового збільшення зум-афокальної системи призводить до відповідної зміни фокусної відстані зум-трансфокатора. Цим досягається пропорційна зміна паралактичного кута та робочого діапазону далекоміра. Водночас, процедура вписування зображення об'єкту в систему виміральної нитей

може бути автоматизованою, що робить користування приладом більш зручним та ефективним.

В роботах [2-10] наведені оптичні схеми різних зум-афокальних систем переважно призначених для використання у візуальних приладах. Вони утворюють або пряме, або перевернуте зображення залежно від їх побудови за схемою Кеплера чи Галілея. Всі ці зум-афокальні системи в своєму складі мають нерухомі та рухомі оптичні компоненти, загальна кількість яких починається з трьох.

Недолік трикомпонентних зум-афокальних систем обумовлений мінливістю їх осьової довжини, що ускладнює механізми зсуву компонентів та конструкцію зум-трансфокатора. Отже, перевагу мають чотирикомпонентні системи, яка полягає в можливості мати незмінним взаємне розташування першого та четвертого компонентів. Але відомі з цитованих робіт чотирикомпонентні системи для покращення умов їх абераційної корекції мають внутрішнє розташування апертурної діафрагми. Проте в умовах функціонування зум-трансфокатора її апертурною діафрагмою слугує апертурна діафрагма фікс-об'єктива, винесена за межі зум-афокальної системи. Через таке специфі-

чне розташування апертурної діафрагми системи аналогів не є цілком придатним для зум-трансфокаторів. Ця обставина викликає потребу створення чотирикомпонентних зум-афокальних систем, в яких розташування апертурної діафрагми є зовнішнім. Розробка методу параметричного синтезу таких систем є метою даної роботи.

### Постановка задачі

Задачею даної роботи є створення методу параметричного синтезу чотирикомпонентної зум-афокальної оптичної системи із зовнішнім розташуванням апертурної діафрагми, яка повинна забезпечувати:

- потрібний діапазон зміни паралактичного кута далекоміру;
- заданий осьовий габарит;
- потрібне розташування апертурної діафрагми із заданим діаметром;
- функціонування в заданому спектральному діапазоні;
- можливість використання в системі однотипних оптичних елементів для зменшення її собівартості.

### Метод параметричного синтезу чотирикомпонентної зум-афокальної оптичної системи

Зум-афокальна система, що зберігає прямий або перевернутий вигляд зображення, сформованою оптичною системою фікс-об'єктиву, повинна бути за типом телескопічної системи Галілея. Її апертурною діафрагмою слугує вхідна зіниця фікс-об'єктиву, що входить у склад трансфокатора.

Для забезпечення можливості використання в системі однотипних оптичних елементів, бажано будувати симетричну чотирикомпонентну зум-афокальну телескопічну систему, в якій першій і четвертій компонент, а також другий і третій компонент є попарно ідентичними, тобто мають однакову оптичну силу  $\Phi_1 = \Phi_4$ ,  $\Phi_2 = \Phi_3$ . На рис. 1 показано таку систему, в якій при кутовому збільшенні  $\gamma = 1$   $d_1^* = d_3^*$ .

В стані, показаному на рис. 1, зум-афокальна симетрична система складається з двох однакових телескопічних систем, повернутих одна до одної на  $180^\circ$ . Між компонентами 2 і 3 промені в пучках – паралельні. Перша телескопічна система, складена з компонентів 1 і 2, має нульову оптичну силу, якщо  $f_1' + f_2' = \frac{1}{\Phi_1} + \frac{1}{\Phi_2} = d_1^* = \frac{L - d_2^*}{2}$ . При

співвідношенні оптичних сил  $\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = k$  із попереднього рівняння

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

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

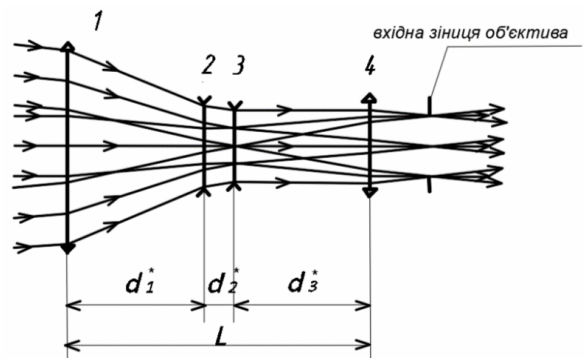


Рис. 1. Чотирикомпонентна симетрична зум-афокальна оптична система при  $\gamma = 1$

Досягнення зум ефекту в системі відбувається завдяки переміщенню другого та третього компонентів. Водночас, кутове збільшення системи повинне мати значення  $\gamma \neq 1$ . Стан такої оптичної системи показано на рис. 2.

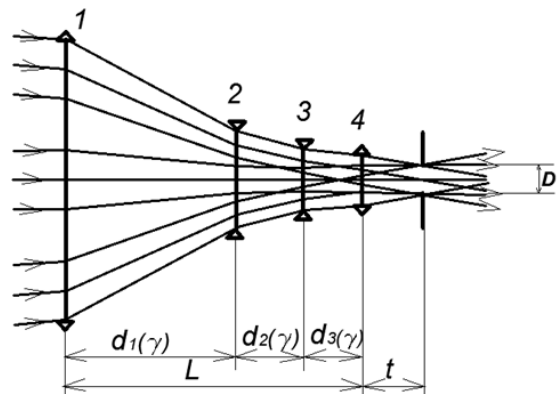


Рис. 2. Чотирикомпонентна зум-афокальна система при  $\gamma \neq 1$

Пряме зображення афокальної оптичної системи з властивостями телескопічної системи Галілеєвського типу при  $\gamma \neq 1$  буде забезпеченим за наступних умов:

- 1) 1 і 2 компоненти оптичної системи утворюють об'єктив телескопічної системи, в свою чергу компоненти 3 і 4 утворюють окуляр з протилежною за знаком оптичною силою;
- 2) задній фокус  $F'_{ob}$  об'єктиву суміщується із переднім фокусом  $F_{ok}$  окуляру;
- 3) кутове збільшення афокальної системи  $\gamma$  повинно відповідати з протилежним знаком відношенню задньої фокусної відстані об'єктиву, що складається з 1 і 2 компонентів, до задньої фокусної відстані окуляра, складеного з 3 та 4 компонентів афокальної системи.

Оптична сила об'єктиву:  $\Phi_{ob} = \Phi_1 + \Phi_2 - d_1\Phi_1\Phi_2$ .

Оптична сила окуляру:

$$\Phi_{ok} = \Phi_3 + \Phi_4 - d_3\Phi_3\Phi_4 = \Phi_2 + \Phi_1 - d_3\Phi_2\Phi_1$$

$$\gamma \in [3^{-1} \dots 3]$$

$$d_2^* = 10$$

Виконанням умови 3) є вираз:

$$\frac{f'_{ob}}{f'_{ok}} = \frac{\Phi_{ok}}{\Phi_{ob}} = \frac{\Phi_1 + \Phi_2 - d_3\Phi_1\Phi_2}{\Phi_1 + \Phi_2 - d_1\Phi_1\Phi_2} = -\gamma.$$

З урахуванням того, що  $\Phi_2 = k\Phi_1$  та  $d_3 = L - d_1 - d_2$ , умова 3) 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 двокомпонентних системи, а саме  $a'_{F'ob}$ ,  $a_{Fok}$  і відстань  $d_2$  були взаємопов'язані:

$$a'_{F'ob} = d_2 + a_{Fok}. \quad (4)$$

Розрахунок фокальних відрізків двокомпонентних субсистем, а саме фокальних відрізків об'єктиву  $a'_{F'ob}$  та окуляру  $a_{Fok}$ , здійснюється за формулами:

$$a'_{F'ob} = f'_{ob}(1 - \Phi_1 d_1) = \frac{1 - \Phi_1 d_1}{\Phi_1(1 + k - d_1 k \Phi_1)};$$

$$a_{Fok} = f_{ok}(1 - \Phi_4 d_3) = \frac{1 - \Phi_1 d_3}{-\Phi_1(1 + k - d_3 k \Phi_1)}.$$

З виразу (4) та співвідношення  $d_3 = L - d_1 - d_2$  отримуємо

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

Для знаходження значень відстаней  $d_1(\gamma)$  та  $d_2(\gamma)$  необхідно розв'язати систему рівнянь, складену з виразів (3) та (5) при умові, що значення величин  $L$  та  $k$  є заданими. Через те, що значення відстані  $d_3(\gamma)$  не може бути від'ємним, розв'язання системи рівнянь показує, що відстань  $d_3(\gamma) = L - d_1(\gamma) - d_2(\gamma)$  обмежує можливий діапазон змін кутового збільшення  $\gamma$  зум-афокальної системи.

Прикладом залежності відстані  $d_3$  від  $\gamma$ ,  $k$  є графіки  $d_3(\gamma, k)$ , показані на рис. 3, отримані при  $d_2^* = 10$  мм,  $L = 100$  мм і двох різних значеннях  $k$ . Графіки залежності відстані  $d_3(\gamma, k)$  демонструють можливі значення  $\gamma$  для моменту, коли  $d_3(\gamma, k)$  досягає нульового значення.

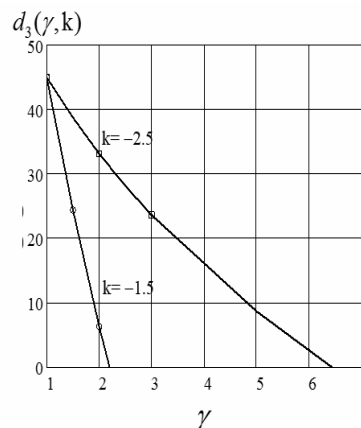


Рис. 3. Графіки залежності відстані між компонентом 3 та 4 від кутового збільшення  $\gamma$  та коефіцієнта  $k$

Для визначення максимального значення кутового збільшення  $\gamma_{\max}$  при умові заданого значення  $k$  і за умови  $d_3(\gamma) = L - d_1(\gamma) - d_2(\gamma) = 0$ , із рівняння (3) отримуємо формулу розрахунку  $\gamma_{\max}(k)$ :

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

Значення  $d_1$  у виразі (6) можна знайти із розв'язання рівняння (5) підставивши в нього  $\Phi_1 = \frac{2(k+1)}{k(L-d_2^*)}$ ,  $d_3 = L - d_1 - d_2 = 0$ ,  $d_2 = L - d_1$ . В результаті отримуємо рівняння відносно невідомої величини  $d_1$  у вигляді:

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

де:  $a = (1+k)k\Phi_1^2$ ,

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

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

Розв'язком рівняння (7) є два корені, з яких прийнятним є:

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

Для прикладу на рис. 4 показано графіки функції  $\gamma_{\max}(k)$ , отримані при умові використання формул (6), (7), (8) та при значенні  $L = 100$  мм.

Графіки, зображені на рис. 4, дають можливість знаходити значення коефіцієнта  $k$  відповідно до потрібного значення  $\gamma_{\max}$ . Отримане значення коефіцієнта  $k$  дозволяє, використовуючи рівняння (1) і (2), розрахувати оптичні сили та фокусні відстані компонентів зум-афокальної системи. Після чого, використовуючи систему рівнянь, складену з виразів (3) та (5), можна отримати фун-

кції  $d_1(\gamma)$ ,  $d_2(\gamma)$ ,  $d_3(\gamma) = L - d_1(\gamma) - d_2(\gamma)$  в діапазоні від  $\gamma_{\max}^{-1}$  до  $\gamma_{\max}$ .

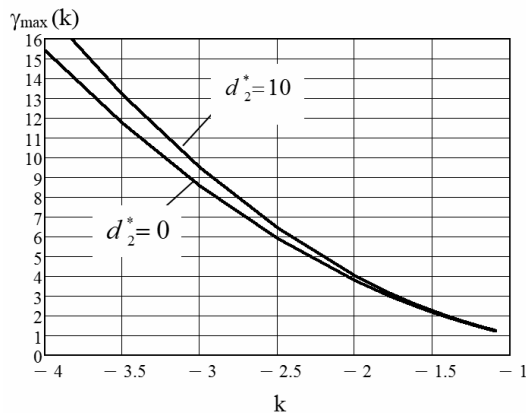


Рис. 4. Графіки залежності максимального значення кутового збільшення  $\gamma_{\max}$  від коефіцієнта  $k$

Наприклад, потрібно мати  $\gamma_{\max} = 3$ . Тоді згідно графіків на рис. 4 при  $d_2^* = 10$  коефіцієнт  $k = -1.75$ . У діапазоні значень  $\gamma \in [3^{-1} \dots 3]$  із розв'язання системи, складених з виразів (3), (5), отримуються функції  $d_1(\gamma)$ ,  $d_2(\gamma)$ ,  $d_3(\gamma)$  графіки, яких представлені на рис. 5.

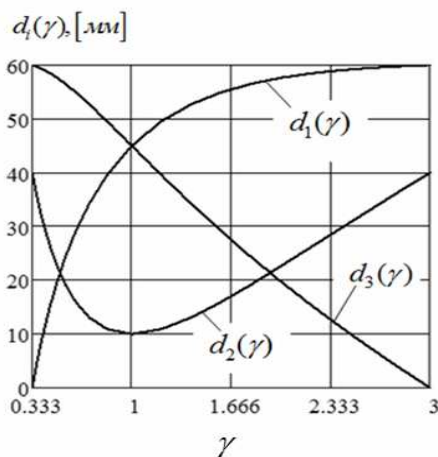


Рис. 5. Графіки відстаней між компонентами як функцій кутового збільшення  $\gamma \in [3^{-1} \dots 3]$  зум-афокальної системи при  $L=100$  мм та  $d_2^* = 10$  мм

Аналіз графіків функцій на рис. 5 надає змогу побачити найбільшу нелінійність функції  $d_1(\gamma)$ , в той момент, коли функції  $d_2(\gamma)$  та  $d_3(\gamma)$  майже лінійні. Ця закономірність спрощує виготовлення та функціонування механізму переміщень цих компонентів. На ділянці  $\gamma \in [0.333 \dots 1]$  спостеріга-

ється найбільша нелінійність вказаних функцій, але ця ділянка може бути необов'язковою до використання.

Отримані результати дозволяють визначити світлові діаметри компонентів зум-афокальної системи в заданому діапазоні кутового збільшення  $\gamma$ . Для визначення світлових діаметрів достатньо використати формули кутів і висот нульового променя, який повинен проходити через всю афокальну систему та виходити через край вихідної зіниці або апертурної діафрагми під кутом  $\omega$ . Значення кута  $\omega$  дорівнює половині кутового поля зору фікс-об'єктиву. Значення світлових діаметрів компонентів, які забезпечують відсутність вин'єтування променів у полі зору  $2\omega$ , дорівнюють подвійній висоті нульового променя.

Формули для світлових діаметрів компонентів, при відсутності вин'єтування, мають вигляд:

$$\varnothing_3(\gamma) = \varnothing_4 - 2d_3(\gamma)[\text{tg}(\omega) + 0.5\varnothing_4\Phi_1], \quad (9)$$

$$\varnothing_2(\gamma) = \varnothing_3(\gamma) - 2d_2(\gamma)[\text{tg}(\omega) + 0.5(\varnothing_4\Phi_1 + \varnothing_3(\gamma)\Phi_2)], \quad (10)$$

$$\varnothing_1(\gamma) = \varnothing_2(\gamma) - 2d_1(\gamma)[\text{tg}(\omega) + 0.5(\varnothing_4\Phi_1 + \varnothing_3(\gamma)\Phi_2 + \varnothing_2(\gamma)\Phi_2)]. \quad (11)$$

Єдиним світловим діаметром, незалежним від кутового збільшення, є діаметр четвертого компонента, для розрахунку якого використовують формулу:

$$\varnothing_4 = D + 2t \cdot \text{tg}(\omega), \quad (12)$$

де  $D$  — діаметр вихідної зіниці, тобто апертурної діафрагми;

$t$  — відстань між апертурною діафрагмою (зіницею) та четвертим компонентом, показано на рис. 2.

Отримані формули (9) – (12) для світлових діаметрів компонентів можна використовувати при допустимому коефіцієнті вин'єтування крайнього пучка променів  $k_\omega = 0.5$ . За умови такого коефіцієнта вин'єтування в формулі (12) потрібно використовувати значення  $D = 0$ .

Із отриманих графіків видно, що при  $\gamma = 3$  найбільший світловий діаметр має перший компонент, тому для зменшення його значення хоча б у 2 рази можна використати допустиме значення  $k_\omega = 0.5$ .

Наведені графіки в роботі [10, fig.5, fig. 6] та графіки на рис. 6 дозволяють порівняти значення відносних отворів компонентів трикомпонентної та чотирикомпонентної систем, що працюють в однакових умовах.

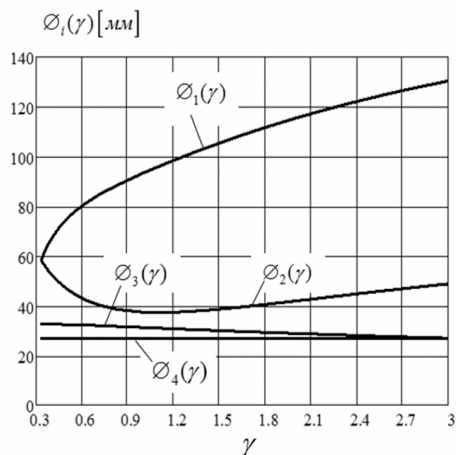


Рис. 6. Графіки залежності світлових діаметрів компонентів від кутового збільшення  $\gamma$  зум-афокальної системи при  $L = 100$  мм,  $f'_1 = f'_4 = 105$  мм,  $f'_2 = f'_3 = -60$  мм,  $D = 20$  мм,  $2\omega = 20^\circ$ ,  $t = 20$  мм,  $k = -1.75$ ,  $d_2^* = 10$  мм.

Так при довжині системи  $L = 100$  мм,  $2\omega = 20^\circ$ ,  $t = 10$  мм,  $\gamma \in [1...3]$ ,  $k_\omega = 1$  найбільшого значення відносного отвору  $\varnothing: f' = 1.32$  досягає другий компонент трикомпонентної системи, та перший компонент чотирикомпонентної системи, у якого максимальне значення  $\varnothing: f' = 1.24$ .

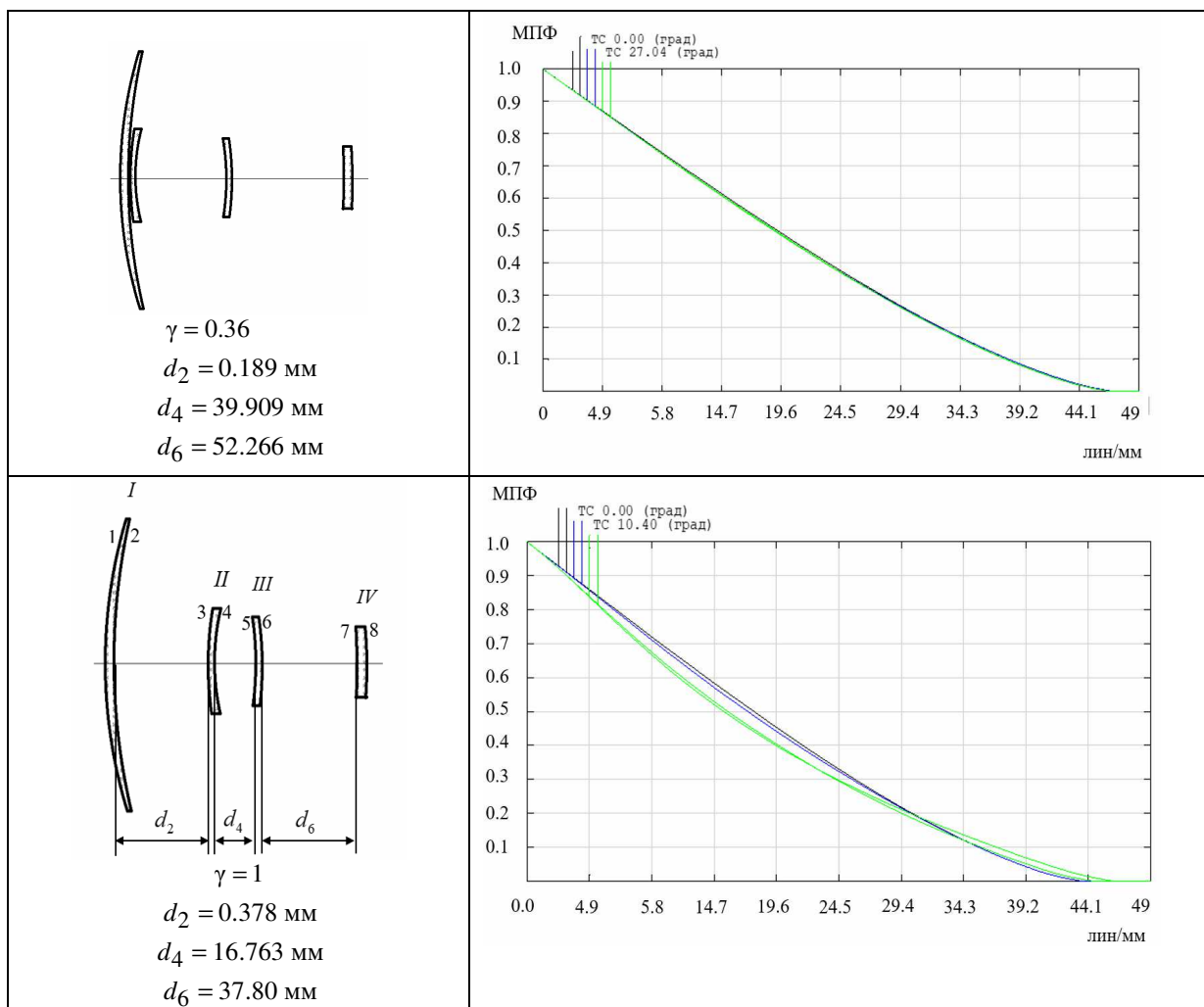
В обох системах вказані отвори можна зменшувати пропорційно коефіцієнту допустимого він'єтування  $k_\omega$ .

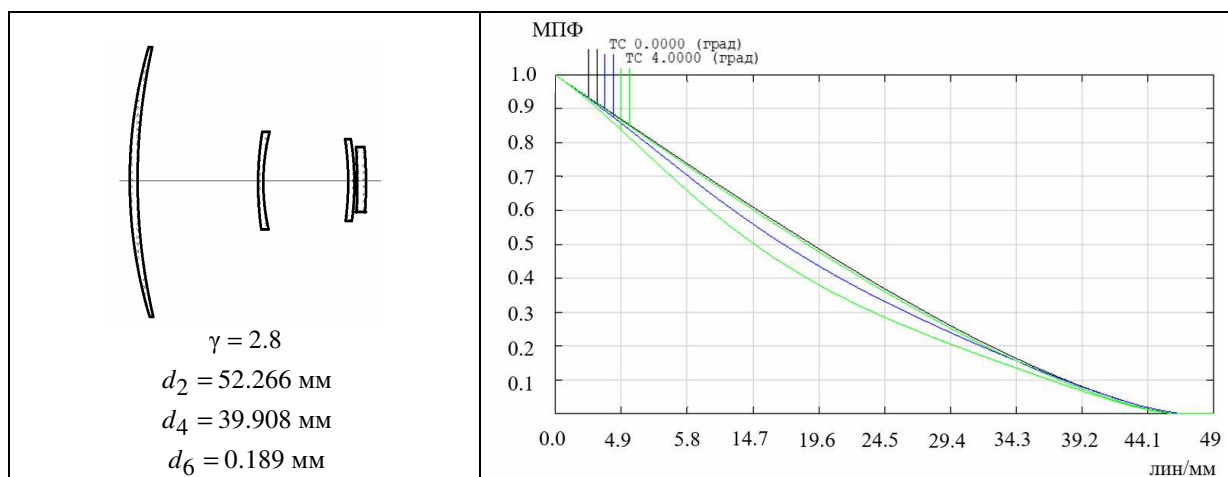
Перевагою чотирикомпонентної системи над трикомпонентною системою є менша нелінійність функцій  $d_i(\gamma)$ .

В таблиці 1 представлені результати використання створеного та представленого в цій роботі методу синтезу зум-афокальної чотирикомпонентної системи, призначеної для роботи в спектральному діапазоні 7-11 мкм.

Всі чотири лінзи системи – германієві. Діапазон зміни кутового збільшення  $\gamma \in [0.36...2.8]$ .

Таблиця 1. Зум-афокальна система, синтезована з використанням методу, запропонованого в даній роботі





Графіки модуляційної передавальної функції (МПФ) отримані для зображень, що знаходяться у фокальній площині параксiального компонента з фокусною відстанню 20 мм, з кутом поля зору  $20^\circ$  та з діаметром апертурної діафрагми 10 мм (на схемах він не показаний). Цей компонент розташований за зум-афокальною системою на відстані 20 мм. Він імітує роботу безабераційного фіксованого об'єктива, тому хід графіків МПФ залежить тільки від наявних аберацій зум-афокальної системи.

Графіки МПФ, отримані для трьох значень кутового збільшення, два з котрих крайні, свідчать про високу якість зображення, наближену до дифракційно обмеженої, яку може забезпечувати синтезована зум-афокальна система.

#### Висновки

На підставі проведених досліджень можна дійти висновків:

1. Запропонований метод параметричного синтезу зум-афокальної чотирикомпонентної оптичної системи для зум-трансфокаторів нитяних далекомірів дозволяє отримувати значення оптичних та геометричних параметрів компонентів системи та закони їх переміщень вздовж оптичної осі на основі вимог до діапазону зміни кутового збільшення, обумовленого потрібною зміною паралактичного кута, вимог до розмірів поля зору, діаметру та положення апертурної діафрагми, допустимого коефіцієнту вин'єтування.

2. Знайдені залежності міжкомпонентних осьових відстаней від значень кутового збільшення є необхідними для програмування драйверів крокових двигунів, що зсувають компоненти, з метою автоматизації процедури комп'ютерно керуваної зміни паралактичного кута далекоміру.

4. Розроблений алгоритм габаритного розрахунку чотирикомпонентних зум-афокальних систем також дозволяє реалізувати комп'ютеризовану автоматизацію їх параметричного синтезу.

5. Наступним напрямком розвитку запропонованого методу проектування чотирикомпонентних зум-афокальних систем із зовнішнім розташуванням вихідної зіниці вважаємо розробку алгоритму абераційного синтезу оптичних компонентів вказаних систем.

#### 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] Artur Hoegle & Johannes Winterot, "Afocal Zoom Lenses and their Applications", in Proceedings of SPIE, October 2012. DOI: 10.1117/12.928849
- [3] Mau-Shiun, Yeh Shin-Gwo, Shiu Mao-Hong Lu First-order analysis of a three-lens afocal zoom system, Opt. Eng., 1997., №4, P.1249–1258.
- [4] David G. Norrie, "Refracting afocal systems in thermal imagers", *Optical engineering*, vol. 25, no. 2, 1986.
- [5] Jinkai Zhang, Xiaobo Chen, Juntong Xi, Zhuoqi Wu, "Paraxial analysis of double-sided telecentric zoom lenses with three components", *Optical engineering*, vol. 53, is. 11, 115103 (11 November 2014). DOI: 10.1117/1.OE.53.11.115103.
- [6] Antonin Miks, Jiri Novak, "Paraxial analysis of four-component zoom lens with fixed distance between focal points", *Applied Optics*, vol. 51, is. 21, pp. 5231–5235, 2012. DOI: 10.1364/AO.51.005231.
- [7] Allen Mann, *Infrared Optics and Zoom Lenses*. Second Edition. SPIE Press, 2009.
- [8] І. Г. Чиж, Теорія оптичних систем: підручник. Київ, Україна: Політехніка, 2022.
- [9] І. Г. Чиж, К. С. Лазаренко, "Зум-афокальна оптична система трансфокатора для інфрачервоного діапазону", Патент на корисну модель № 151469, опубл. 27.07.2022, Бюл. № 30.

[10] I. Chyzh, K. Lazarenko, "Three-component lens zoom-afocal transfocal systems", in *6th International Scientific and Practical Conference «International Scientific Discussion: Problems,*

*Tasks and Prospects»*, Brighton, United Kingdom, 2023, pp.509-521. DOI: 10.51582/interconf.19-20.03.2023.054.

UDC 535.317.2

**K. Lazarenko, I. Chyzh**

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

#### FOUR-COMPONENT ZOOM-AFOCAL SYSTEMS ZOOM-TRANSFOCACATORS OF THREAD RANGE METERS

The problem addressed in this research is the parametric synthesis of zoom-afocal optical systems for trans-focusors used in measurement technology, specifically thread-type rangefinders. The research aims to develop a universal analytical algorithm that can be computerized for calculating the optical and dimensional parameters of four-component zoom-afocal lens systems for trans-focusors.

The implementation methodology involves representing the zoom-afocal system as a sequence of thin components. Using a system of equations where the optical powers of the components and the distances between them are unknown, the values of these parameters are determined to achieve the desired range of angular magnification and zero optical power of the afocal system. The optical powers of the components and their ratios must ensure positive values for the distances between the components. The calculation of the light diameters of the components takes into account the permissible vignetting of the ray bundle from the field of view edge by determining the angles and heights of the zero rays on the system's components.

The research results include analytical dependencies that enable the determination of component optical powers and their mutual arrangements throughout the entire range of angular magnification based on the input data. The research shows that the first component has the largest light diameter, which reaches its maximum value as the angular magnification approaches the maximum within the specified range.

The obtained results allow for the parametric synthesis of four-component zoom-afocal systems in an analytical form, considering the dimensional requirements, range of angular magnification, and permissible vignetting of ray bundles from the field of view.

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

*Надійшла до редакції  
16 червня 2023 року*

*Рецензовано  
28 липня 2023 року*



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