

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-9>

УДК528.51

ЧИЖ Ігор

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-9565-1951>

e-mail: [i.g.chizh@gmail.com](mailto:i.g.chizh@gmail.com)

ЛАЗАРЕНКО Карина

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-1174-8191>

e-mail: [karinalisnak97@gmail.com](mailto:karinalisnak97@gmail.com)

## ВИЗНАЧЕННЯ ДИСТАНЦІЇ НИТЯНИМ ДАЛЕКОМІРОМ ІЗ ЗУМ-ТРАНСФОКАТОРОМ

*В роботі наведені результати дослідження явища зсуву переднього фокусу зум-трансфокатора в нитяних далекомірах, пов'язаного із зміною кутового збільшення зум-афокальної системи. Показано, що ігнорування цього зсуву при розрахунках дальності може суттєво впливати на точність результату вимірювань. Розглянуто два типи зум-афокальних систем, що входять в систему зум-трансфокатора – двокомпонентної та чотирикомпонентної. Знайдено формулу переднього фокального відрізка трансфокатора з двокомпонентною афокальною системою. Викладено метод розрахунку переднього фокального відрізка трансфокатора з чотирикомпонентною афокальною системою. Для обох афокальних систем наведені формули розрахунку дальності, які дозволяють враховувати зсув переднього фокусу при зміні кутового збільшення афокальної системи.*

*Ключові слова:* нитяний далекомір із зум-трансфокатором, двокомпонентна зум-афокальна система, чотирикомпонентна зум-афокальна система, похибка далекометрії

CHYZH Igor, LAZARENKO Karyna

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

## DETERMINING THE DISTANCE WITH STADIAMETRIC THREAD RANGEFINDERS WITH ZOOM LENSES

*The influence of the angular increase of the zoom-afocal system of the zoom zoom lens on the shift of its front focus, the position of which determines the exact value of the measured distance, is studied. Two variants of the zoom-afocal system are considered. The first version of the two components contains two fixed vario lenses. The second option has four lens components, of which the first and fourth are fixed, the second and third are movable. For an afocal system consisting of two components, an analytical expression is found for a segment that indicates the position of the front focus of the zoom lens depending on the angular magnification of this system. For an afocal system consisting of four components, a method has been developed and presented for calculating the position of the front focus of a zoom lens, which depends on the angular magnification of the afocal system. The exact formulas for calculating the range determined by the indicated rangefinders are given. Graphs and calculations showing the shift of the front focus of the zoom are given. It is shown that the shift of the front focus is significant. This shift must be taken into account when determining the exact distance to the measurement object.*

*Key words:* stadiametric thread rangefinders with zoom, two-component zoom-afocal system, four-component zoom-afocal system, distance measurement error

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В роботі [1] зроблено огляд сучасних оптичних далекомірів активного та пасивного типу. Пасивні мають суттєву перевагу над активними, яка полягає в їх можливості функціонувати скритно. Серед пасивних особлива увага приділена нитяним далекомірам завдяки їх більшій компактності та придатності до автоматизації вимірювального процесу. Проте традиційні нитяні далекоміри з постійним паралактичним кутом мають обмежений і фіксований діапазон вимірювань через використання в них об'єктивів з фіксованою фокусною відстанню (фікс-об'єктивів), [2, 3]

Відомі нитяні далекоміри [11], в яких можлива невелика варіація паралактичного кута, призначена лише для більш точного вимірювання сформованого фікс-об'єктивом зображення бази, наприклад, фрагменту геодезичної лінійки.

Для суттєвого розширення діапазону вимірювань нитяного далекоміру в [1, 4] запропоновано замінити фікс-об'єктив на зум-трансфокатор – об'єктив із змінною в широких межах фокусною відстанню. Зум-трансфокатор складається із зум-афокальної оптичної системи і фікс-об'єктива. Варіація значень фокусної відстані трансфокатора досягається завдяки зміні кутового збільшення афокальної системи. Але в такому трансфокаторі передній фокус немає сталого фіксованого положення вздовж оптичної осі. До того ж зсув переднього фокусу може відбуватися у відносно великому діапазоні, тим більшому, чим більшим є кутове збільшення і фокусна відстань фікс-об'єктива. Ігнорування цього явища може призводити до помітних і навіть недопустимих похибок вимірювання дистанції до об'єкту. Тому задачею даної роботи є

пошук точної функціональної залежності довжини переднього фокального відрізка від кутового збільшення афокальної системи, а також від параметрів і конструкції оптичної системи всього трансфокатора. Мета – отримання формул, необхідних для коректного розрахунку дистанції до об'єкту, а також для проєктування зум-трансфокаторів при створенні нових сучасних моделей нитяних далекомірів.

### Аналіз впливу положення фокусу $F$ на відстань $c$

На рис.1 показано принципову оптичну схему традиційного нитяного далекоміру з фікс-об'єктивом.

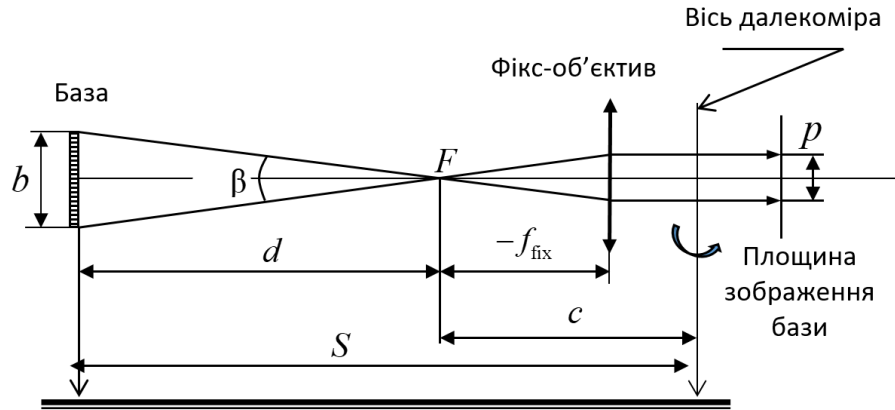


Рис.1 До принципу дії нитяного далекоміра:  $b$  – база – об'єкт або фрагменту об'єкту з відомими розмірами;  $\beta$  – паралактичний кут;  $f'_{\text{fix}}$  – фокусна відстань фікс-об'єктиву,  $p$  – відстань між «нитями»

Функцію бази виконує або геодезична (нівелірна) метрична лінійка, яка знаходиться поруч з об'єктом, або відомий вертикальний чи горизонтальний розмір всього об'єкта – зріст людини, висота чи довжина автомобіля, розміри корпусу плавзасобу, тощо. Базою також може бути відомий за розмірами фрагмент об'єкту, коли сам об'єкт за розмірами виходить за межі поля зору далекоміру.

В сучасних далекомірах «нитями» слугують призначені рядки і стовпчики матриці фоточутливих елементів. Матриця фотоприймача в такому разі є робочою мірою далекоміру.

В нитяних далекомірах із сталим паралактичним кутом  $\beta = 2 \arctg \frac{p}{2f'_{\text{fix}}}$  забезпечується сталим

значенням фокусної відстані фікс-об'єктиву  $f'_{\text{fix}}$  і сталою відстанню  $p$  між «нитями». При цьому вимірювана відстань  $S$ :

$$S = d + c = \frac{f'_{\text{fix}} \cdot b}{p} + c = K b + c, \quad (1)$$

де  $d = K b$ ,  $K = \frac{f'_{\text{fix}}}{p}$  – коефіцієнт нитяного далекоміра,  $c$  – відстань між переднім фокусом  $F$  фікс-об'єктиву та вертикальною віссю обертання далекоміра, рис.1.

Інша картина виникає, коли в нитяному далекомірі з метою суттєвого розширення діапазону вимірювань дистанції  $S$  замість фікс-об'єктиву використовується зум-трансфокатор, який має у своєму складі зум-афокальну систему, розташовану перед фікс-об'єктивом.

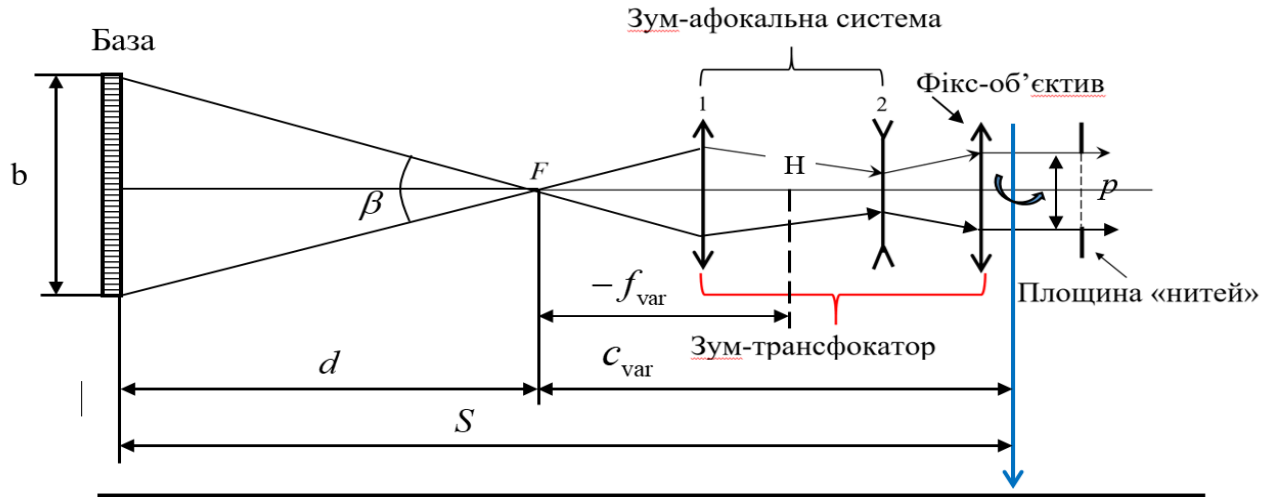


Рис. 2 Зум-трансфокатор нитяного далекоміра з двокомпонентною зум-афокальною системою

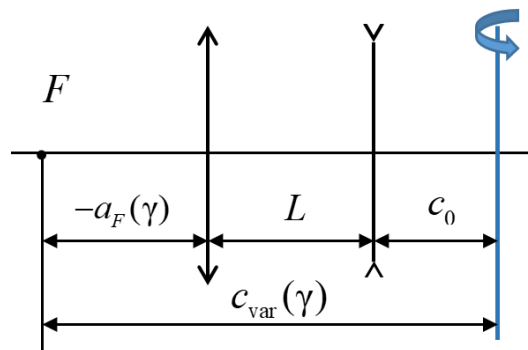


Рис. 3 До визначення відстані  $c_{var}(\gamma)$

При зміні кутового збільшення  $\gamma$  зум-афокальної системи фокусна відстань зум-трансфокатора  $f'_T$  змінюється згідно виразу (2):

$$f'_T = \gamma \cdot f'_{fix}, \quad (2)$$

де  $f'_{fix}$  – фокусна відстань фікс-об'єктива. При цьому коефіцієнт нитяного далекоміра теж змінюється відповідно до формули

$$K = \frac{f'_T}{p} = \frac{f'_{fix} \gamma}{p}. \quad (3)$$

Відрізок  $C$  у формулі (1) також замінюється – на відрізок  $c_{var}(\gamma)$ , який згідно рис. 3:

$$c_{var}(\gamma) = L + c_0 - a_F(\gamma). \quad (4)$$

Як видно, цей відрізок також є залежним від  $\gamma$  через залежність довжини відрізка  $a_F(\gamma)$  від  $\gamma$ .

Оскільки передній фокус трансфокатора  $F$  не має сталого положення вздовж оптичної осі, то визначення дистанції  $S$  потребує даних про функціональну залежність  $a_F(\gamma)$ . Ігнорування існування залежностей  $a_F(\gamma)$  і  $c_{var}(\gamma)$  є виправданим лише тоді, коли вказані відрізки є набагато меншими відрізка

$d$  і ними можна нехтувати. Якщо це не так, то ігнорування зміни положення переднього фокусу  $F$  зум-трансфокатора може призводити до недопустимих похибок вимірювання  $S$ .

Змінність величини переднього фокального відрізка  $a_F(\gamma)$  трансфокатора при варіаціях  $\gamma$  суттєво залежить від структури зум-афокальної системи, яка може складатися із двох, трьох, чотирьох і навіть більшої кількості компонентів. Компоненти можуть бути як з фіксованими  $\Phi_{fix}$ , так із змінними  $\Phi_{var}$  оптичними силами. В табл.1 наведено декілька можливих варіантів реалізації зум-афокальних систем для зум-трансфокаторів нитяних далекомірів. Загальною властивістю цих систем є сталість їх осьового габариту, що сприяє спрощенню механізмів і конструкції самого зум-трансфокатора. Компоненти систем в табл.1 представлені їх головними площинами. Індокси у наведених параметрах означають: var – варіаційний, fix – фіксований параметр.

Зум-афокальна система з двох компонентів може мати сталий осьовий габарит  $L$  лише у випадку, кожний з компонентів має змінну оптичну силу. Функції таких компонентів можуть виконувати варіокол лінзи з великими світловими отворами фірми Optotune EL-16-40-TC [ $\pm 10$  Dpt], та ML-20-37 [ $\pm 18$  Dpt], рис. 3 [5].

Для побудови трикомпонентних зум-афокальних систем з незмінним осьовим габаритом потрібно, щоб хоча б один з компонентів мав змінну оптичну силу [6-8].

Лише чотирикомпонентні системи мають незмінним осьовий габарит при наявності у всіх компонентів фіксованої оптичної сили. Це дозволяє виготовляти лінзові компоненти з оптичних матеріалів, прозорих в потрібних ділянках оптичного діапазону, в тому числі і в далекому інфрачервоному, в якому вказані на рис. 3 варіолінзи не є прозорими.

З перелічених зум-афокальних систем найбільш перспективними є двокомпонентні з нерухомими варіолінзами, що працюють у видимому та ближчому інфрачервоному діапазоні, а також чотирикомпонентні системи із двома рухомими внутрішніми лінзами. Останні здатні забезпечувати далекоміру функціонування як у видимому, так і в далекому інфрачервоному діапазоні, при умові, що лінзи виготовлені з оптичних матеріалів, прозорих у вказаних діапазонах.

Таблиця 1

Зум-афокальні системи зум-трансфокаторів	
Зум-афокальна система	Оптична система
Двокомпонентна	
Трикомпонентна	

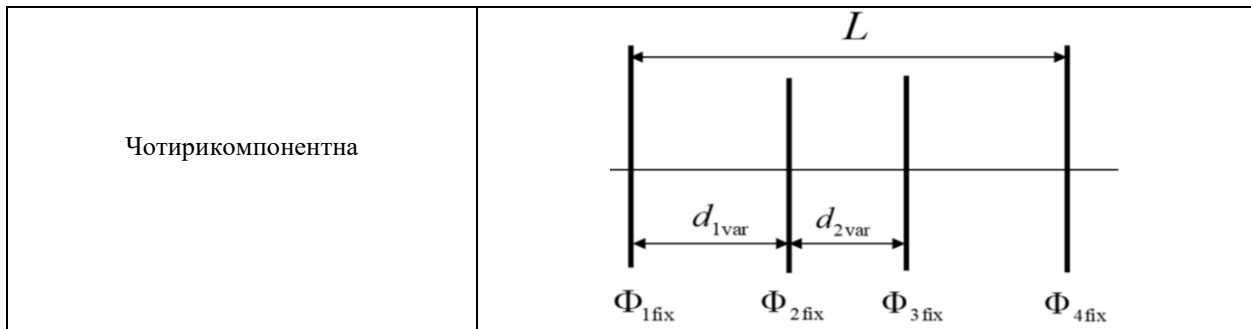


Рис. 3 Моделі варіолінз фірми Optotune

#### Аналіз функції $a_F(\gamma)$ двокомпонентної зум-афокальної системи на варіолінзах.

Оптична система, складена з двох варіокомпонентів при незмінній відстані між ними є зум-афокальною, коли оптичні сили першого та другого варіо-компонентів мають оптичні сили, що змінюються відповідно до кутового збільшення  $\gamma$  згідно виразів (5) та (6):

$$\Phi_{1\text{var}}(\gamma) = \frac{\gamma - 1}{\gamma L} ; \quad (5)$$

$$\Phi_{2\text{var}}(\gamma) = \frac{1 - \gamma}{L} . \quad (6)$$

На рис. 4 показані графіки  $\Phi_{1\text{var}}(\gamma)$  та  $\Phi_{2\text{var}}(\gamma)$ .

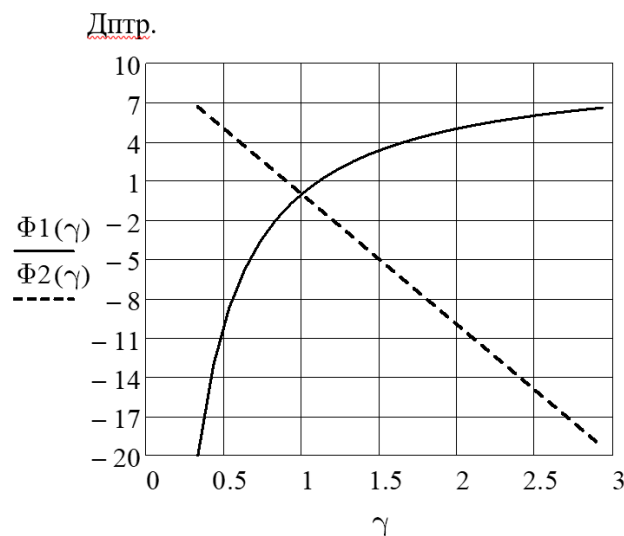


Рис. 4 Графіки оптичних сил в діоптріях першого та другого компонентів зум-афокальної системи залежні від значення кутового збільшення  $\gamma$

На цих графіках обрано діапазон зміни кутового збільшення  $\gamma$  зум-афокальної системи в інтервалі  $\left[\frac{1}{3} \dots 3\right]$ , є таким, який забезпечують варіолінзи ML-20-37  $[\pm 18 \text{ Dpt}]$ .

На рис. 5 а) показано систему зум-трансфокатора із зум-афокальною системою галілеєвського типу на варіолінзах. Така система не змінює тип зображення (прямого чи перевернутого), сформованого фікс-об'єктивом. Фікс-об'єктив є нерухомим відносно зум-афокальної системи. Він має незмінну оптичну силу  $\Phi_{\text{fix}}$  і фіксовану відстань  $d_0$ . Відрізок  $a_F$  вказує положення переднього фокусу  $a_F(\gamma)$  зум-трансфокатора відносно його переднього компоненту.

Для зручності пошуку функції  $a_F(\gamma)$  система, показана на рис. 5 а), повернута на  $180^\circ$ , рис. 5 б).

З останнього рисунку видно, що відрізок

$$a_F = \frac{h_3}{\alpha_4}, \quad (7)$$

де  $\alpha_4$  – тангенс кута нахилу нульового променя до оптичної осі.

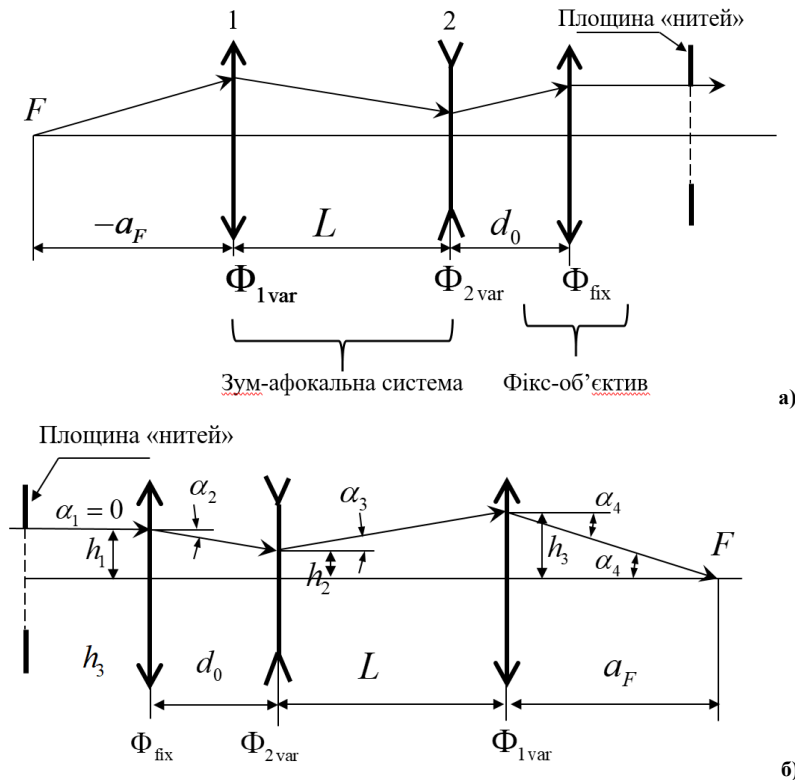


Рис. 5 Оптична система зум-трансфокатора з двокомпонентною зум-афокальною системою: а) в прямому ходу променів; б) в зворотному ходу променів, система повернута на  $180^\circ$

Проходження через всю систему променю, вказаного на рис. 5 б), можна знайти за допомогою формул кутів та висот нульового променя в системі, що представлена компонентами та їх оптичними силами [ 9,10 ]:

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k + h_k \Phi_k, \quad (8)$$

$$h_{k+1} = h_k - d_k \alpha_{k+1}, \quad (9)$$

У формулах (7), (8)  $\Phi_k$  – оптична сила компонента з номером  $k$ ,  $h_k$  – висота нульового променя на компоненті з номером  $k$ ,  $d_k$  – осьова відстань між сусідніми компонентами з номерами  $k$  і  $k+1$ .

Застосовуючи послідовно формули (8), (9), до кожного компонента системи, представленої на рис. 5 б), а також використовуючи формули (4), (5), (6), в кінцевому результаті отримуємо вираз для відрізка  $a_F(\gamma)$ :

$$a_F(\gamma) = L\gamma - (f'_{\text{fix}} - d_0)\gamma^2, \quad (10)$$

$$\text{де } \gamma = -\frac{\Phi_{2\text{var}}}{\Phi_{1\text{var}}}, \quad (11)$$

$f'_{\text{fix}}$  – задня фокусна відстань фікс-об'єктива трансфокатора.

Формула (10) відтворює знак відрізка  $a_F(\gamma)$  коли система зум-трансфокатора знаходиться в положенні на рис. 5 а).

З виразу (10) витікає, що положення переднього фокусу трансфокатора не залежить від абсолютних значень оптичних сил компонентів зум-афокальної системи, а визначається згідно (11) лише їх співвідношенням. Залежність  $a_F(\gamma)$  в загальному випадку є квадратичною, але, коли  $f'_{\text{fix}} = d_0$  (випадок суміщення переднього фокусу фікс-об'єктива з головними точками компонента 2, рис.5 а)), то вираз (10) отримує вигляд:

$$a_F(\gamma) = L\gamma, \quad (12)$$

який демонструє пряму пропорційну лінійну залежність  $a_F$  від  $L$  і  $\gamma$ .

Формула (12) виявляє факт значного зсуву переднього фокусу трансфокатора вздовж оптичної осі при змінах значення  $\gamma$ . Зсув може набагато перевищувати осьову довжину  $L$  зум-афокальної системи.

Так, наприклад, при  $L = 100$  мм,  $d_0 = 0$  і порівняно невеликому діапазоні зміни  $\gamma \in \left[\frac{1}{3} \dots 3\right]$ , передній фокус  $F$  трансфокатора зсувається згідно виразу (12) вздовж оптичної осі на дистанції  $[33.33 \dots 300]$  мм в глиб оптичної системи трансфокатора (рис. 5 а).

Із рівняння (10) можна знайти значення кутового збільшення  $\gamma$ , при якому функція  $a_F(\gamma)$  досягає локального максимуму. Згідно (10) це значення:

$$\gamma_{\text{max}} = \frac{L}{2(f'_{\text{fix}} - d_0)}, \quad (13)$$

звідки

$$[a_F(\gamma_{\text{max}})] = \frac{L^2}{4(f'_{\text{fix}} - d_0)}. \quad (14)$$

При інших значеннях відрізка  $d_0$  поведінка функції  $a_F(\gamma)$  суттєво змінюється, рис. 6. Так на тому ж прикладі в інтервалі значень від  $\gamma = \frac{1}{3}$  до  $\gamma_{\text{max}}$  функція  $a_F(\gamma)$  зростає, фокус  $F$  зум-трансфокатора зсувається вправо, вглиб оптичної системи. Після проходження значення  $a_F(\gamma_{\text{max}})$  фокус  $F$  починає зсуватися в протилежному напрямку, в напрямку до об'єкту, отримуючи при цьому великі від'ємні значення, рис. 6.

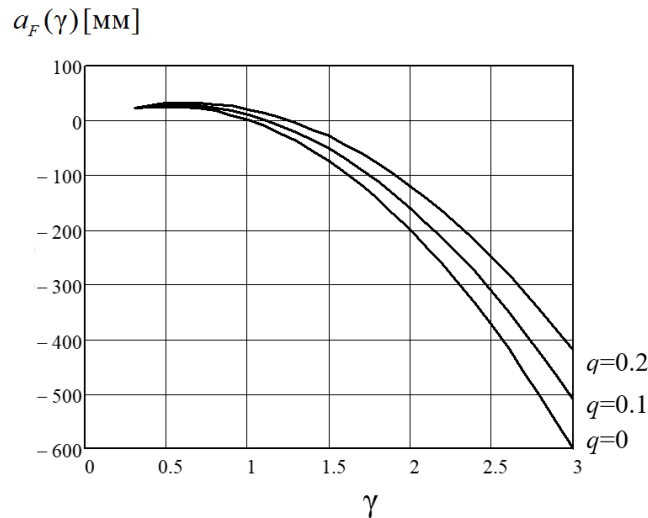


Рис. 6 Графіки  $a_F(\gamma)$  при  $L = 100$  мм,  $f'_{\text{fix}} = 100$  мм,  $q = \frac{d_0}{f'_{\text{fix}}}$

За результатами здійсненого аналізу дистанцію між об'єктом далекометрії та вертикальною віссю нитяного далекоміру потрібно визначати за формулою:

$$S = \frac{f'_{\text{fix}} \gamma b}{p} + (1 - \gamma)L + (f'_{\text{fix}} - d_0)\gamma^2 + c_0 \quad (15)$$

Формула (15) враховує зміну значення коефіцієнта нитяного далекоміра  $K = \frac{f'_{\text{fix}}}{p} \gamma$ , а також зміну відстані між переднім фокусом зум-трансфокатора і вертикальною віссю далекоміру, які є залежними від кутового збільшення  $\gamma$  зум-афокальної системи.

Процес вимірювання дистанції передбачає автоматичне програмне чи ручне керування драйверами варіолінз до моменту встановлення такого кутового збільшення  $\gamma$  зум-афокальної системи, при якому зображення об'єкту вписується між «нитями» далекоміру. Знайдене у такий спосіб значення  $\gamma$  далі автоматично використовується для розрахунку дистанції  $S$  за формулою (15) за допомогою мікрокомп'ютера, вбудованого в далекомір.

#### Аналіз функції $a_F(\gamma)$ чотирикомпонентної зум-афокальної системи, складеної із лінзових компонентів з фіксованою оптичною силою

Метою аналізу є дослідження положення переднього фокусу зум-трансфокатора, в якому використовується чотирикомпонентна зум-афокальна система, представлена в [4].

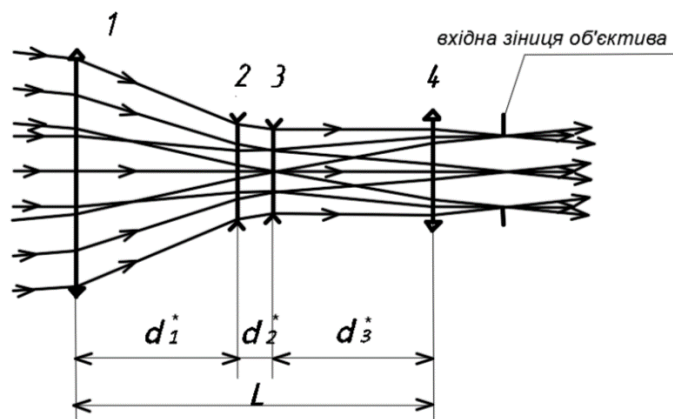


Рис.7 4-компонентна зум-афокальна система



Оптичні сили компонентів вказаної на рис.7 системи, розраховуються за формулами

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = k; \quad (16)$$

$$\Phi_1 = \Phi_4 = \frac{k+1}{k} \frac{2}{L-d_2^*} = \frac{2(k+1)}{k(L-d_2^*)}; \quad (17)$$

$$\Phi_2 = \Phi_3 = k\Phi_1 = \frac{2(k+1)}{L-d_2^*}, \quad (18)$$

де  $k$  – задане число,  $d_2^*$  – відстань між другим і третім компонентами, при значенні кутового збільшення  $\gamma=1$ . Осьові відстані між компонентами  $d_1(\gamma)$ ,  $d_2(\gamma)$  і  $d_3(\gamma)$  при інших значеннях  $\gamma$  знаходяться з розв’язку системи рівнянь (18) – (20):

$$1+k-(L-d_1-d_2)k\Phi_1 = -\gamma(1+k-d_1k\Phi_1); \quad (19)$$

$$d_2\Phi_1 = \frac{1-\Phi_1d_1}{(1+k-d_1k\Phi_1)} + \frac{1-\Phi_1(L-d_1-d_2)}{1+k-(L-d_1-d_2)k\Phi_1}; \quad (20)$$

$$d_3(\gamma) = L-d_1(\gamma)-d_2(\gamma). \quad (21)$$

Для аналізу положення переднього фокусу зум-трансфокатора з 4-х компонентною зум-афокальною системою хід нульового променя здійснювався з використанням формул (8), (9) через повернутий на  $180^\circ$  трансфокатор, рис.8 б).

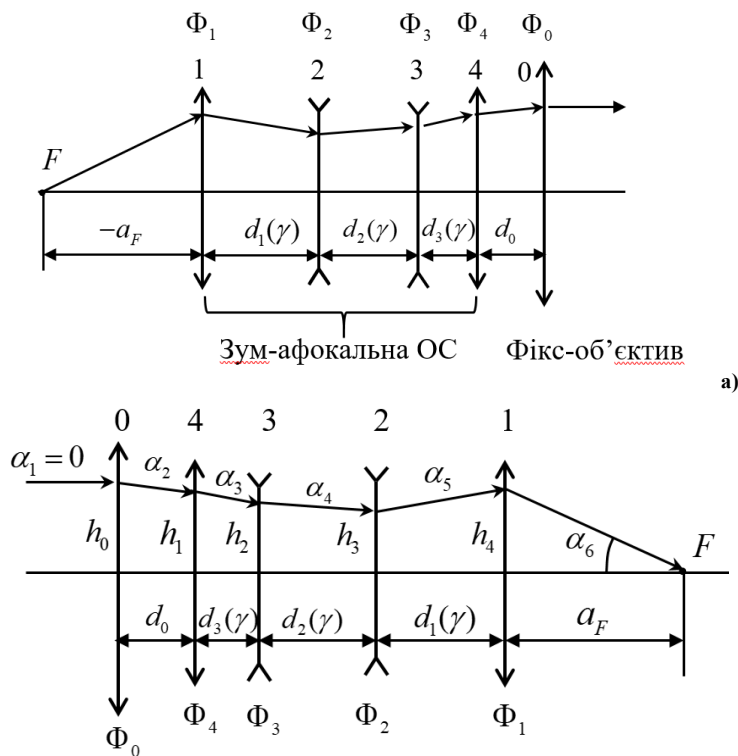


Рис.8 Оптична система зум-трансфокатора з 4-х компонентною зум-афокальною системою 1,2,3,4 – компоненти зум-афокальної системи, 0 – фікс-об’єктив: а) система в прямому ході; б) система повернута на  $180^\circ$

З рис.8 б) фокальний відрізок :

$$a_F = \frac{h_4}{\alpha_6} \quad (22)$$

Послідовне використання формул (8) та (9) до кожного компонента системи через складну залежність осьових відстаней між компонентами від  $\gamma$  настільки ускладнює аналітичний вигляд виразів для  $h_4$  та  $\alpha_6$ , що користуватися такими виразами стає неможливим. Тому для аналізу функції  $a_F(\gamma)$  був здійснений комп'ютерний розрахунок ходу нульового променя через систему трансфокатора, повернуту на  $180^\circ$ , рис.8 б). Спочатку із розв'язку системи рівнянь (16) – (21) знаходилися осьові відстані  $d_i(\gamma)$ , а потім за допомогою формул (8), (9), (22) розраховувалися параметри нульового променя і значення відрізка  $a_F(\gamma)$ .

На рис. 9 показано відтворені у такий спосіб графіки функції зум- трансфокатора в діапазоні  $\gamma = [0.33...3]$ , з осьюовою довжиною зум-афокальної системи  $L = 100$  мм, оптичними силами компонентів

$$\Phi_1 = \Phi_4 = \frac{1}{105} \text{мм}^{-1}, \Phi_2 = \Phi_3 = -\frac{1}{60} \text{мм}^{-1} \text{ і коефіцієнтом } k = 1.75.$$

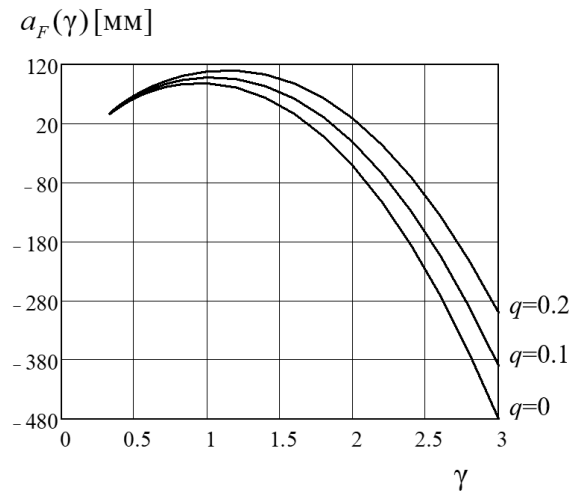


Рис. 9 Графіки функції  $a_F(\gamma)$  зум-трансфокатора з 4-х компонентною зум-афокальною системою:

а) фокусна відстань фікс-об'єктива  $f'_{fix} = 100$  мм;  $q = \frac{d_0}{f'_{fix}}$

Графіки на Рис. 9 свідчать про те, що зсув переднього фокусу в зум-трансфокаторі з 4-х компонентною зум-афокальною системою, як і в трансфокаторі з 2-х компонентною афокальною системою, є значним і має такий самий характер залежності від кутового збільшення  $\gamma$ . Величина зсуву є значною і не може бути проігнорованою при розрахунках дистанції  $S$  до об'єкту.

Дистанція  $S$  в даному далекомірі розраховується за формулою:

$$S = \frac{f'_{fix} \gamma b}{p} + L + c_0 - a_F(\gamma), \quad (23)$$

де  $c_0$  - відстань між задньою головною площиною 4-го компонента зум-афокальної системи і вертикальною віссю далекоміра, рис.3. Функція  $a_F(\gamma)$ , що присутня у виразі (23), попередньо визначається для конкретного нитяного далекоміра з урахуванням конкретних конструктивних параметрів оптичної системи зум-трансфокатора. Функція  $a_F(\gamma)$  зберігається в пам'яті мікрокомп'ютера далекоміра для подальшого оперативного використання.

### Аналіз результатів досліджень функції $a_F(\gamma)$ зум-трансфокаторів

Практичне значення результатів досліджень функції  $a_F(\gamma)$ , можна показати на прикладі нитяного далекоміра, в якого фікс-об'єктив має фокусну відстань  $f'_{fix} = 100$  мм,  $L = 100$  мм,  $\gamma = [1...3]$ ,  $q = 0.1$ . В далекомірі робочою мірою слугує ПЗЗ або КМОП матриця, за допомогою якої вимірюється розмір зображення базового елемента (геодезичної лінійки). Формат матриці –  $(\frac{1}{2})''$ . В такій матриці відстань між крайніми по вертикалі рядками пікселів, які використовуватися як «ниті»,  $p = 4.8$  мм. База геодезичної лінійки  $b = 2$  м. Допустима відносна похибка вимірювання дистанції  $\pm 0.2\%$ .

Через зміну кутового збільшення  $\gamma$  коефіцієнт  $K$  нитяного далекоміра змінюється в інтервалі значень

$$K = \frac{f'_T}{p} = \frac{f'_{fix} \gamma}{p} = \frac{100 \cdot (1...3)}{4.8} = 20.8...62.5.$$

При цьому діапазон вимірювань далекоміра становить:

$$d = K \cdot b = (20.8...62.5) \cdot 2 \text{ м} = 41.6 \text{ м}...125 \text{ м}.$$

У вказаному діапазоні залежно від значень  $\gamma$  та  $K$  допустима абсолютна похибка вимірювання дистанції становить

$$\pm 0.002d = \pm(0.083...0.25) \text{ м} = \pm(83...250) \text{ мм}.$$

В таблиці 2 наведені дані про допустиму абсолютну похибку  $\pm \delta d(\gamma)$  вимірювання дистанції  $S$  відповідно до значення  $\gamma$ . В нижніх рядках показані значення відрізка  $a_F(\gamma)$ , отримані вище для 2-х та 4-х компонентних зум-афокальних систем трансфокатора.

Таблиця 2

До порівняння значень  $\pm \delta d(\gamma)$  і  $a_F(\gamma)$

$\gamma$	1	1.5	2.0	2.5	3.0
$K(\gamma)$	20.8	31.25	41.67	52.08	62.5
$d(\gamma)$ [м]	41.6	62.5	83.34	104.16	125
$\pm \delta d(\gamma)$ [мм]	83.2	125	166.7	208.3	250
$a_F(\gamma)$ [мм] (2-х комп.)	+10	-52.5	-160	-312.5	-510
$a_F(\gamma)$ [мм] (4-х комп.)	+98.13	+72.7	-11.5	-166	-390

Із представленою в табл.2 стає очевидним, що ігнорування функції  $a_F(\gamma)$  при розрахунках дистанції  $S$  за формулами (15) або (23) може призводити до недопустимих похибок визначення  $S$ . Тому ігнорування зсуву переднього фокусу зум-трансфокатора в нитяних далекомірах є недопустимим за виключенням випадків, коли значення  $a_F(\gamma)$  є набагато меншими допустимих абсолютних похибок  $\pm \delta d(\gamma)$ .

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Використання в нитяному далекомірі зум-трансфокатора з метою збільшення діапазону вимірювань потребує врахування зсуву переднього фокусу вздовж оптичної осі при змінах кутового збільшення афокальної системи, що необхідно для забезпечення потрібної точності далекометрії.

2. Аналіз функцій  $a_F(\gamma)$  двох різних за схемою зум-трансфокаторів показав, що двокомпонентна і чотирикомпонентна зум-афокальні системи, які за структурою відрізняються, при однакових вихідних умовах мають практично однаковий характер залежності  $a_F$  від  $\gamma$ .

3. Отримані формули і метод розрахунку функцій  $a_F(\gamma)$  дозволяють при проектуванні нитяного далекоміра із зум-трансфокатором закладати в програму обчислення дистанції  $S$  поправку на зсув переднього фокусу зум-трансфокатора, пов'язану із зміною фокусної відстані.

4. Подальші дослідження особливостей функціонування зум-трансфокаторів у складі нитяних далекомірів потрібно присвятити аналізу впливу поздовжніх аберацій реальних оптичних компонентів на похибки далекометрії.

#### Література

1. Лазаренко, К., & Чиж, І. . (2022). ПРИНЦИПИ ДІЇ ТАСУЧАСНІ ЗАСОБИ ОПТИЧНОЇ ДАЛЕКОМЕТРІЇ. *MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES*, (4), 18–32. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-2>. Оптические дальномеры. Нитяной дальномер. [Електронний ресурс] .— Режим доступу: <https://helpiks.org/7-40636.html>.
3. Allen Mann/, *Infrared Optics and Zoom Lenses/SPIE Publications*— 2009— P. 164.
4. Зум-афокальна оптична система трансфокатора для інфрачервоного діапазону. Чиж І.Г., Лазаренко К.С. Патент на корисну модель № 151469, Опубл. 27.07. 2022, Бюл. №30.
5. Вариолінзи фірми Optotune [Електронний ресурс] .— Режим доступу: <https://www.optotune.com/el-16-40-tc-lens>
6. Artur Hoegele / *Afocal Zoom Lenses and their Applications* [Електронний ресурс]., Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/258720089>
7. Chyzh I., Lazarenko K. / *Three-component lens zoom-afocal transfocal systems / Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference «International Scientific Discussion: Problems, Tasks and Prospects» (March 19-20, 2023)/Brighton, United Kingdom Scientific Collection InterConf — №31[147] —March, 2023— P.509-521. DOI 10.51582/interconf.19-20.03.2023.054*
8. Mau-Shiun , Yeh Shin-Gwo, Shiue Mao-Hong Lu / *First-order analysis of a three-lens afocal zoom system// Opt. Eng., —1997—№4— P.1249–1258 .*
9. Antonin Miks ,Jiri Novak/ *Paraxial analysis of four-component zoom lens with fixed distance between focal points/Applied Optics —2012 —№ 2.1— P.5231–5235.*
10. Чиж І.Г./ *Теорія оптичних систем : підручник / Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського/Вид-во «Політехніка» —2022— с.426 .*

#### References

1. Lazarenko K., & Chyzh I. . (2022). PRINCIPLES OF OPERATION AND MODERN MEANS OF OPTICAL RANGEFINDER. *MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES*, (4), 18–32. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-2>
2. Opticheskiye dal'nomery.Nityanoy dal'nomer. [Elektronnyy resurs].— Rezhym dostupu: <https://helpiks.org/7-40636.html>
3. Allen Mann/, *Infrared Optics and Zoom Lenses/SPIE Publications*— 2009— P. 164.
4. Patent na korysnu model' № 151469 Ukrayiny. MPK (2006.01) G02B 13/12. Zum-afokal'na optychna systema transfokatora dlya infrachervonoho diapazonu / Chyzh I.H., Lazarenko K.S. ; zayavnyk i patentovlasnyk Natsional'nyy tekhnichnyy universytet Ukrayiny "Kyivivs'kyu politekhnichnyy instytut Ihorya Sikors'koho". — № u 2022 01140 ; zayav. 08.04.2022 ; opubl. 27.07. 2022, Byul. № 30.
5. Optotune vario lenses [Elektronnyy resurs].— Rezhym dostupu: <https://www.optotune.com/el-16-40-tc-lens>
6. Artur Hoegele / *Afocal Zoom Lenses and their Applications* [Elektronnyy resurs].— Rezhym dostupu: <https://www.researchgate.net/publication/258720089>
7. Chyzh I., Lazarenko K. / *Three-component lens zoom-afocal transfocal systems / Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference «International Scientific Discussion: Problems, Tasks and Prospects» (March 19-20, 2023)/Brighton, United Kingdom Scientific Collection InterConf — №31[147] —March, 2023— P.509-521/ DOI 10.51582/interconf.19-20.03.2023.054*
8. Mau-Shiun , Yeh Shin-Gwo, Shiue Mao-Hong Lu / *First-order analysis of a three-lens afocal zoom system// Opt. Eng., —1997— №4— P.1249–1258 .*
9. . Antonin Miks ,Jiri Novak/ *Paraxial analysis of four-component zoom lens with fixed distance between focal points/Applied Optics —2012 —№ 2.1— P.5231-5235.*
10. Chyzh I.H. /*Theory of optical systems: textbook/ Kyiv: KPI named after Igor Sikorskyi/Polytechnic Publishing House— 2022— 426 p.*