

УДК 623.4.084.7

О.А. Ткаченко, І.Г. Чиж

ТЕРМОДЕФОКУСУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ В ОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ

We obtain the working formulae. Applying the analytical method, they allow analyzing the temperature effect of optical and mechanical elements of optical system on value of the image temperature defocusing, formed by optical system. Abbe invariant is used to determine the segment, which indicates the position of the image plane relative to the last optical surface of the optical system and is dependent on the temperature magnitude. The formulae permit calculating the value of temperature movement of the image plane according to data of structural parameters of optical system, data of constructions of mechanical details, as well as the data of temperature coefficients of optical system and materials of mechanical details. The account of the local temperature distribution of optical and mechanical components of the optical block device is possible. Furthermore, the method also allows us solving the synthesis problem of optical block, in which the position of the image plane must be constant with temperature fluctuations in a given interval.

Вступ

Відомо, що якість зображення, сформованого реальною оптичною системою, може істотно відрізнитися від якості зображення, розрахованого при номінальних значеннях її конструктивних параметрів. Головними причинами є технологічні похибки виготовлення оптичної системи, а також залежність її конструктивних параметрів від температури [1]. Технологічні похибки конструктивних параметрів, тобто їх відхилення від номінальних значень, є сталими і їх можна визначити та компенсувати. Проте температурні коливання значень конструктивних параметрів оптичної системи можуть змінюватися у часі та в значних діапазонах. Відомо, що вони змінюються залежно від таких чинників:

- температури навколишнього середовища, що може змінюватися в межах ± 60 °С;
- функціонування пристрою охолодження фотоприймача, який істотно впливає на формування температурних полів через теплообмін із прилеглими до нього елементами системи, а також внаслідок потрапляння холодоагента всередину корпусу оптичного приладу [2];
- власного тепловиділення функціональних елементів системи;
- аеродинамічного нагріву зовнішніх оптичних елементів, який може досягати температур до 1000 °С і більше [3].

Усі ці фактори неминуче призводять до виникнення температурних зсувів відносно площини фотоелектричного аналізу зображень, сформованих термонестабільною оптичною системою, що може істотно погіршувати технічні характеристики оптично-електронної апаратури. Тому розробникам такої апаратури ще на стадії її проектування потрібно вирішувати

проблему термостабілізації системи за рахунок правильної побудови оптичної системи, точного вибору оптичних і конструкційних матеріалів, конструкцій оправ та інших конструкційних елементів приладу [4–6]. Але для цього потрібно мати точне уявлення про залежність просторового положення оптичного зображення при заданих коливаннях температур оптичних і механічних деталей, та при відомих розподілах температур між цими деталями під час функціонування приладу.

Комп'ютерні програми, які використовують у процесі проектування оптичних систем – ZEMAX, CODE V, дають можливість за допомогою чисельних методів враховувати температурний стан оптичної системи й аналізувати вплив температури. Але при цьому вони не дають можливості моделювати складні температурні режими, а тим більше розв'язувати зворотні задачі – задачі синтезу оптичних систем із врахуванням можливої їх температурної нестабільності. Задачі синтезу коректніше й ефективніше розв'язуються при використанні аналітичних методів, які поки що не достатньо розвинуті в області термоаналізу оптичних систем. Тому актуальним є розроблення саме аналітичного методу, який даватиме змогу здійснювати детальний аналіз термоаберацій і розв'язувати задачі термоабераційного синтезу оптичних систем ще на ранніх стадіях їх проектування.

Постановка задачі

Питання компенсації температурних аберацій потребує детального аналізу впливу на зображення кожного конструктивного параметра оптичної системи, а саме: радіусів кривизни оптичних поверхонь, осьових відстаней між ними, показників заломлення і термооптичних

коефіцієнтів оптичних матеріалів, коефіцієнтів температурного лінійного розширення всіх конструкційних і оптичних матеріалів.

Мета роботи – знайти математичні вирази, які даватимуть можливість аналітичним методом досліджувати просторове положення площини зображення при глобальних і локальних змінах температури всіх оптичних та механічних елементів оптичного блока приладу для методичного забезпечення процедур параметричної оптимізації оптичних систем приладів із врахуванням температурної нестабільності їх конструктивних параметрів для підвищення температурної стабільності цих приладів у процесі їх експлуатації.

Метод розрахунку термодифокусування зображень в оптичних системах

Метод заснований на застосуванні теорії оптики параксіальних і нульових променів, зокрема інваріанта Аббе, який встановлює зв'язок між конструктивними параметрами оптичних елементів системи (радіусами r_k , осовими відстанями d_k , показниками заломлення n_k) та відстанями до площини предметів S_k і до площини зображення S'_k , де k – номер оптичної поверхні [7].

На рис. 1 наведено центровану оптичну систему, складену із p оптичних поверхонь. Необхідно встановити варіації останнього відрізка S'_p під впливом зміни температури на величину Δt . Приймається умова, що вся система рівномірно прогрілася і набула значення нової температури $t_0 + \Delta t$.

Для виведення формули $dS'_p = dS'_p(\Delta t)$ скористаємося формулою відрізків параксіаль-

ного променя

$$\frac{n'_k}{S'_k} - \frac{n_k}{S_k} = \frac{n'_k - n_k}{r_k}, \quad (1)$$

а також інваріантом Аббе

$$Q_K = n'_k \left(\frac{1}{r_k} - \frac{1}{S'_k} \right) = n_k \left(\frac{1}{r_k} - \frac{1}{S_k} \right). \quad (2)$$

Усі параметри, що входять до виразу (1), залежать від температури, тому коректною є рівність диференціалів лівої (Л) і правої (П) частин рівняння (1), а саме:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Л}{\partial n'_k} \Delta n'_k + \frac{\partial Л}{\partial n_k} \Delta n_k + \frac{\partial Л}{\partial S'_k} \Delta S'_k + \frac{\partial Л}{\partial S_k} \Delta S_k = \\ = \frac{\partial П}{\partial n'_k} \Delta n'_k + \frac{\partial П}{\partial n_k} \Delta n_k + \frac{\partial П}{\partial r_k} \Delta r_k. \end{aligned}$$

Із врахуванням (2) наведене вище рівняння перетворюється до виразу

$$\begin{aligned} \frac{n_{k+1}}{(S'_k)^2} \Delta S'_k - \frac{n_k}{(S_k)^2} \Delta S_k = \\ = -Q_K \left(\frac{\Delta n_{k+1}}{n_{k+1}} - \frac{\Delta n_k}{n_k} \right) + \frac{n_{k+1} - n_k}{r_k^2} \Delta r_k, \quad (3) \end{aligned}$$

де $\Delta S'_k, \Delta S_k, \Delta n_{k+1}, \Delta n_k, \Delta r_k$ – температурні прирости відрізків і конструктивних параметрів відповідно, пов'язані зі зміною температури на величину Δt .

У формулі (3) величини S_k і S'_k доцільно виразити через кути α_k і α'_k , використовуючи співвідношення $\frac{h_k}{S'_k} = \alpha_{k+1}$; $\frac{h_k}{S_k} = \alpha_k$,

тому що відрізки S_k або S'_k можуть набувати нескінченно великих значень, незручних для виконання розрахунків, в той час як відповідні їм кути α_k і α'_k (рис. 2) при цьому спрямовуються до малих величин, що наближаються до нуля.

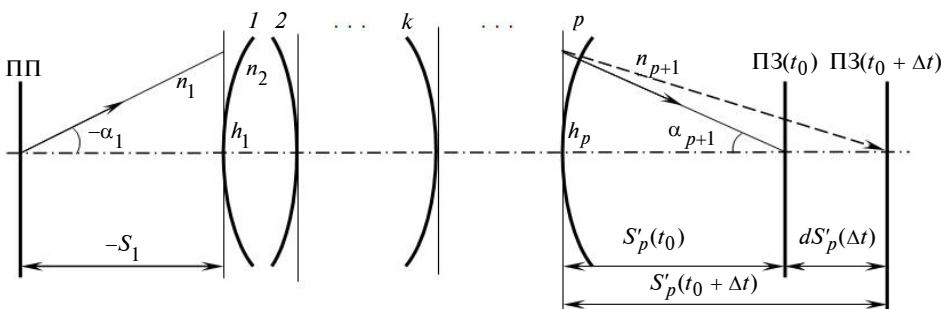


Рис. 1. Оптична система, яка підлягає термоаналізу: ПП – площина предметів; ПЗ – площина зображень

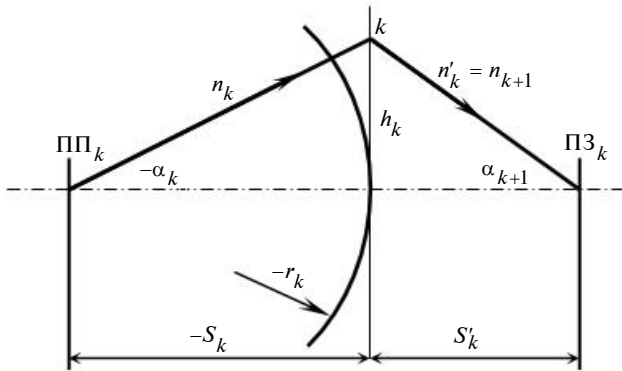


Рис. 2. Оптична поверхня як фрагмент оптичної системи

Величину ΔS_k , яка вказує на температурний зсув проміжної площини предметів ПП_k , можна виразити через величину $\Delta S'_{k-1}$, тобто величину температурного зсуву проміжної площини зображення ПЗ_{k-1} , сформованого попередньою $(k-1)$ -ю поверхнею. При цьому рівняння (3) набуде вигляду

$$n_{k+1} \alpha_{k+1}^2 \Delta S'_k - n_k \alpha_k^2 \Delta S'_{k-1} + n_k \alpha_k^2 \Delta d_{k-1} = -Q_K h_k^2 \left(\frac{\Delta n_{k+1}}{n_{k+1}} - \frac{\Delta n_k}{n_k} \right) + (n_{k+1} - n_k) \frac{h_k^2}{r_k^2} \Delta r_k. \quad (4)$$

Якщо рівняння (4) застосувати до кожної оптичної поверхні оптичної системи (ОС), а потім скласти ліві й праві частини рівнянь, отриманих для кожної поверхні, то після тотожних перетворень у кінцевому результаті отримуємо формулу розрахунку величини осьового зсуву оптичного зображення, викликаного зміною температури ОС:

$$\Delta S'_p = \frac{n_1 \alpha_1^2}{n_{p+1} \alpha_{p+1}^2} \Delta S_1 - \sum_{k=1}^{k=p} \frac{h_k^2}{n_{p+1} \alpha_{p+1}^2} \left[Q_K \left(\frac{\Delta n_{k+1}}{n_{k+1}} - \frac{\Delta n_k}{n_k} \right) - (n_{k+1} - n_k) \frac{\Delta r_k}{r_k^2} \right] - \frac{1}{n_{p+1} \alpha_{p+1}^2} \sum_{k=2}^{k=p} n_k \alpha_k^2 \Delta d_{k-1}, \quad (5)$$

де ΔS_1 – можливий температурний зсув площини предметів ОС, а $n_{p+1} = 1$, якщо за системою знаходиться повітря.

При розташуванні предмета на нескінченності $\Delta S_1 = 0$ і $\alpha_1 = 0$. За умови нормування останнього кута нульового (параксiального) променя $\alpha_{p+1} = 1$ висота променя на вході в систему $h_1 = f'$, де f' – задня фокусна відстань системи. При цьому формула (5) набуває простішого вигляду:

$$\Delta S'_p = - \sum_{k=1}^{k=p} h_k^2 \left[Q_K \left(\frac{\Delta n_{k+1}}{n_{k+1}} - \frac{\Delta n_k}{n_k} \right) - (n_{k+1} - n_k) \frac{\Delta r_k}{r_k^2} \right] - \sum_{k=2}^{k=p} n_k \alpha_k^2 \Delta d_{k-1}. \quad (6)$$

Праву частину виразу (6) можна привести до вигляду, більш зручного для практичного застосування. Для цього виразимо величини, що входять до нього, через приращення температури $\Delta t = (t - 20)^\circ\text{C}$, де 20°C – номінальна температура нормальних умов експлуатації оптичного приладу. При цьому температурні прирости конструктивних параметрів ОС мають такі вирази [6]:

$$\Delta n_{k+1} = n_{k+1}(t^\circ) - n_{k+1}(20^\circ) = \beta_{k+1}^* \Delta t; \quad (7)$$

$$\Delta n_k = n_k(t^\circ) - n_k(20^\circ) = \beta_k^* \Delta t; \quad (8)$$

$$\Delta r_k = r_k(t^\circ) - r_k(20^\circ) = r_k \alpha_{r_k}^* \Delta t, \quad (9)$$

де β_{k+1}^* , β_k^* – коефіцієнти температурного приросту показників заломлення середовищ з номерами $(k+1)$ і k відповідно; $\alpha_{r_k}^*$ – коефіцієнт температурного розширення оптичного середовища, на якій виготовлена поверхня з номером k .

Першу суму в правій частині виразу (6), яка являє собою вплив температурних змін радіусів і показників заломлення середовищ, для більш зручного практичного застосування перетворимо до такого вигляду:

$$\sum_{k=1}^{k=p} h_k \left[h_k Q_K \left(\frac{\Delta n_{k+1}}{n_{k+1}} - \frac{\Delta n_k}{n_k} \right) - (n_{k+1} - n_k) \frac{h_k}{r_k} \frac{\Delta r_k}{r_k} \right] = \sum_{k=1}^{k=p} h_k \left[\left(\frac{h_k}{r_k} - \frac{h_k}{S'_k} \right) \Delta n_{k+1} - \left(\frac{h_k}{r_k} - \frac{h_k}{S_k} \right) \Delta n_k - (n_{k+1} - n_k) \frac{h_k}{r_k} \frac{\Delta r_k}{r_k} \right].$$

Так як $\frac{h_k}{S'_k} = \alpha_{k+1}$; $\frac{h_k}{S_k} = \alpha_k$; а $(n_{k+1} - n_k) \times$
 $\times \frac{h_k}{r_k} = (n_{k+1}\alpha_{k+1} - n_k\alpha_k)$ відповідно до відомої із
 теорії оптичних систем формули кутів нульово-
 го променя, то

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{k=p} h_k \left[\left(\frac{h_k}{r_k} - \alpha_{k+1} \right) \Delta n_{k+1} - \left(\frac{h_k}{r_k} - \alpha_k \right) \Delta n_k - \right. \\ & \quad \left. - (n_{k+1}\alpha_{k+1} - n_k\alpha_k) \frac{\Delta r_k}{r_k} \right] = \\ & = \sum_{k=1}^{k=p} h_k \left[\frac{h_k}{r_k} (\Delta n_{k+1} - \Delta n_k) - (\Delta n_{k+1}\alpha_{k+1} - \Delta n_k\alpha_k) - \right. \\ & \quad \left. - (n_{k+1}\alpha_{k+1} - n_k\alpha_k) \frac{\Delta r_k}{r_k} \right]. \end{aligned}$$

Із врахуванням (7), (8) і (9) останній ви-
 раз, який представляє першу суму правої ча-
 стини виразу (6), перетвориться до вигляду

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{k=p} h_k \left[\frac{h_k}{r_k} (\beta_{k+1}^* - \beta_k^*) - (\beta_{k+1}^*\alpha_{k+1} - \beta_k^*\alpha_k) - \right. \\ & \quad \left. - (n_{k+1}\alpha_{k+1} - n_k\alpha_k) \alpha_{r_k}^* \right] \Delta t. \end{aligned}$$

Друга сума у виразі (6) описує вплив на
 величину $\Delta S'_p$ температурних змін осьових тов-
 щин оптичних елементів системи (лінз, пластин), а також температурних змін повітряних осьових відстаней між оптичними елементами. Зрозуміло, що залежність від температури товщин оптичних елементів і повітряних проміжків мають різну природу. Так, приріст Δd_{k-1} осьової товщини оптичної деталі, середовище якої має номер k , розраховується за формулою $\Delta d_{k-1} = d_{k-1}(20^\circ + \Delta t) - d_{k-1}(20^\circ) = d_{k-1}\alpha_{d_k}^* \Delta t$, де $\alpha_{d_k}^*$ – температурний коефіцієнт лінійного розширення оптичного середовища, осьова довжина якої має номер k .

Якщо припустити, що повітряні проміжки між оптичними елементами від температури не змінюються, тобто для них справедливо $\alpha_k^* \equiv 0$,

то друга сума у правій частині виразу (6) дорівнює величині $\sum_{k=2}^{k=p} n_k \alpha_k^2 d_{k-1} \alpha_k^* \Delta t$.

Проте повітряні проміжки між оптичними елементами мають складну температурну залежність, обумовлену конструкцією кріплення оптичних деталей в приладі, а також властивостями конструкційних матеріалів.

На рис. 3 наведено найпростішу конструкцію кріплення двох лінз, в якій забезпечення номінальної відстані d_{k-1} забезпечується металевим циліндром.

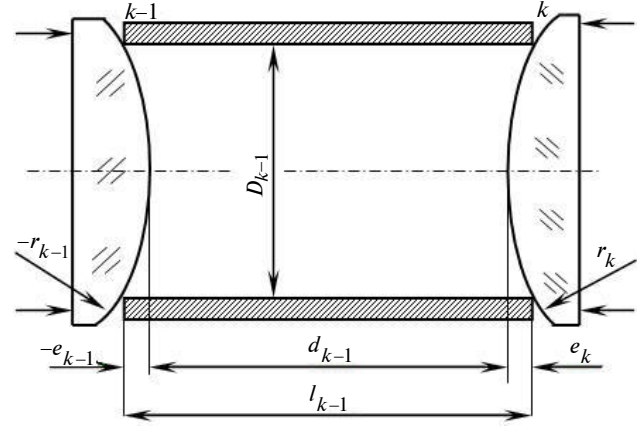


Рис. 3. Схема кріплення двох лінз (до виведення формули (14))

З рис. 3 видно, що $-e_{k-1} + d_{k-1} + e_k = l_{k-1}$, звідки $d_{k-1} = l_{k-1} + e_{k-1} - e_k$.

При цьому температурний приріст відрізка d_{k-1} визначається за допомогою формули

$$\begin{aligned} \Delta d_{k-1} &= \frac{\partial d_{k-1}}{\partial l_{k-1}} \Delta l_{k-1} + \frac{\partial d_{k-1}}{\partial e_{k-1}} \Delta e_{k-1} - \frac{\partial d_{k-1}}{\partial e_k} \Delta e_k = \\ &= \Delta l_{k-1} + \Delta e_{k-1} - \Delta e_k, \end{aligned} \quad (10)$$

вигляд якої зумовлений тим, що всі часткові похідні у цьому виразі дорівнюють одиниці. При цьому приріст

$$\Delta l_{k-1} = l_{k-1} \gamma_{k-1}^* \Delta t, \quad (11)$$

де γ_{k-1}^* – температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу, з якого виготовлений циліндр, що знаходиться між лінзами та забезпечує номінальне значення d_{k-1} при нормальній температурі.

Приріст висот кульових сегментів e_{k-1} і e_k (в оптичному виробництві такі висоти називають стрілками світових зон оптичних поверхонь) можна знайти, скориставшись виразом $e \approx D^2(8r)^{-1}$ [7], з якого видно, що величини стрілок залежать від діаметра внутрішньої поверхні циліндра та радіусів оптичних поверхонь лінз, що опираються на нього. Тоді

$$\begin{aligned} \Delta e_{k-1} &= \frac{\partial e_{k-1}}{\partial D_{k-1}} \Delta D_{k-1} + \frac{\partial e_{k-1}}{\partial r_{k-1}} \Delta r_{k-1} = \\ &= \frac{2D_{k-1}}{8r_{k-1}} \Delta D_{k-1} - \frac{D_{k-1}^2}{8r_{k-1}^2} \Delta r_{k-1} = \\ &= \frac{D_{k-1}^2}{8r_{k-1}} \left(\frac{2\Delta D_{k-1}}{D_{k-1}} - \frac{1}{r_{k-1}} \Delta r_{k-1} \right) = \\ &= e_{k-1} \left(\frac{2\Delta D_{k-1}}{D_{k-1}} - \frac{\Delta r_{k-1}}{r_{k-1}} \right). \end{aligned}$$

Оскільки $\Delta D_{k-1} = D_{k-1} \gamma_{k-1}^* \Delta t$, а $\Delta r_{k-1} = r_{k-1} \alpha_{r_{k-1}}^* \Delta t$, де $\alpha_{r_{k-1}}^*$ – температурний коефіцієнт розширення матеріалу лівої оптичної деталі, то

$$\Delta e_{k-1} = e_{k-1} (2\gamma_{k-1}^* - \alpha_{r_{k-1}}^*) \Delta t. \quad (12)$$

Аналогічно отримуємо формулу для розрахунку температурного приросту стрілки e_k :

$$\Delta e_k = e_k (2\gamma_{k-1}^* - \alpha_{r_k}^*) \Delta t, \quad (13)$$

де α_k^* – температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу лінзи, що на рис. 3 знаходиться справа.

Підставляючи в (10) вирази (11)–(13), отримуємо для повітряного проміжку, тобто середовища з номером $(k-1)$, таку формулу:

$$\begin{aligned} \Delta d_{k-1} &= \\ &= \left[l_{k-1} \gamma_{k-1}^* + e_{k-1} (2\gamma_{k-1}^* - \alpha_{r_{k-1}}^*) - e_k (2\gamma_{k-1}^* - \alpha_{r_k}^*) \right] \Delta t = \\ &= d_{k-1} \left[\frac{l_{k-1}}{d_{k-1}} \gamma_{k-1}^* + \frac{e_{k-1}}{d_{k-1}} (2\gamma_{k-1}^* - \alpha_{r_{k-1}}^*) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{e_k}{d_{k-1}} (2\gamma_{k-1}^* - \alpha_{r_k}^*) \right] \Delta t = d_{k-1} \eta_{k-1}^* \Delta t, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_{k-1}^* &= \frac{l_{k-1}}{d_{k-1}} \gamma_{k-1}^* + \frac{e_{k-1}}{d_{k-1}} (2\gamma_{k-1}^* - \alpha_{r_{k-1}}^*) - \\ &\quad - \frac{e_k}{d_{k-1}} (2\gamma_{k-1}^* - \alpha_{r_k}^*), \end{aligned} \quad (14)$$

де η_{k-1}^* – інтегральний коефіцієнт температурного приросту довжини повітряного проміжку з номером $(k-1)$, що враховує особливості конструкції кріплення лінз.

Формула (14) відповідає найпростішій конструкції, показаній на рис. 3. Якщо ж кріплення лінз буде іншим, то інший вигляд буде мати формула розрахунку величини η_{k-1}^* . Знайти універсальну формулу розрахунку η_{k-1}^* , мабуть, неможливо.

Із врахуванням викладеного, загальний вираз величини температурного зсуву площини зображення, сформованого всією ОС – $\Delta S'_p$, набуде такого вигляду:

$$\begin{aligned} \Delta S'_p &= - \left\{ \sum_{k=1}^{k=p} h_k \left[\frac{h_k}{r_k} (\beta_{k+1}^* - \beta_k^*) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - (\beta_{k+1}^* \alpha_{k+1} - \beta_k^* \alpha_k) - (n_{k+1} \alpha_{k+1} - n_k \alpha_k) \alpha_{r_k}^* \right] + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=2}^{k=p} n_k \alpha_k^2 d_{k-1} \alpha_{d_{k-1}}^* + \sum_{k=2}^{k=p} \alpha_k^2 d_{k-1} \eta_{k-1}^* \right\} \Delta t. \end{aligned} \quad (15)$$

Для коректного використання формули (15) потрібно враховувати те, що в ОС на повітряних проміжках $\alpha_{d_{k-1}}^* = 0$, а там, де присутні оптичні матеріали, $\eta_{k-1}^* = 0$.

Аналіз виразу (15)

У виразі (15) перша і друга суми разом демонструють вплив на величину $\Delta S'_p$ температурних змін конструктивних параметрів оптичних елементів системи, третя сума показує внесок у величину $\Delta S'_p$ механічних деталей оптичного блока приладу. Для компенсації температурного дефокусування зображення, тобто для виконання при $\Delta t \neq 0$ умови $\Delta S'_p = 0$ необхідно, щоб третя сума дорівнювала з протилежним знаком результату складання двох перших

сум. Виконання цієї умови можна досягнути відповідною побудовою механічної частини оптичного блока та вибором матеріалів його конструкції.

Кожний доданок в (15) показує внесок у величину $\Delta S'_p$ окремих конструктивних параметрів й оптичних елементів системи, що дає можливість, по-перше, із порівнянь величин доданків виявляти найбільш термонестабільні ділянки ОС, і, по-друге, здійснювати оптимізацію ОС і конструкції оптичного блока за критерієм мінімуму температурної нестабільності ще на стадії їх проектування.

Вираз (15) призначений для розрахунків значень $\Delta S'_p$ у тому разі, коли всі оптичні та механічні елементи мають однаковий приріст температури Δt . Але цей вираз можна також застосовувати і в тих випадках, коли кожний елемент або група елементів отримали різні прирости температури. За таких обставин величину Δt_k , винесену в (15) за знак дужки як загальний множник, необхідно внести під знаки сум з наданням величинам Δt_k індивідуальних значень для кожної окремої групи елементів оптичного блока приладу.

Методика термоаналізу ОС, в якій використовується вираз (15), була апробована при створенні інфрачервоного оптично-електронного координатора, що дало змогу істотно підвищити його термостабільність. Результати

практичного використання цієї методики буде наведено на прикладах аналізу та синтезу оптичних блоків приладів спеціального призначення у наступній статті авторів.

Висновки

Метод і формули розрахунків термодифузії площини зображень, наведені у цій статті, дають можливість здійснювати поелементний аналіз впливу на величину осьового температурного зсуву зображення кожної оптичної та механічної деталі оптичного блока і тим самим виявляти джерела температурної нестабільності приладу.

Отримані математичні вирази дають змогу розв'язувати задачі синтезу оптичних систем і конструкції оптично-механічних блоків, тому що термооптичні коефіцієнти оптичних матеріалів, коефіцієнти температурних розширень матеріалів, а також конструктивні параметри ОС, наявні в цих виразах у явному чи неявному вигляді.

Подальші дослідження факторів, що призводять до температурної нестабільності оптичних систем, потрібно спрямувати на розроблення аналітичних методів інженерного аналізу та синтезу оптичних приладів з можливим нерівномірним розподілом температур як серед елементів, так і в самих оптичних і механічних елементах приладу під час його функціонування.

1. *Волосов Д.С.* Фотографическая оптика (Теория, основы проектирования, оптич. характеристики): Учеб. пособие для вузов. – М.: Искусство, 1978. – 544 с.
2. *Хадсон Р.* Инфракрасные системы. – М.: Мир, 1972. – 534 с.
3. *Leite Clelio D. Ferreira.* Aerothermal Effects on the Infra-red Seeker Staring Sensor Performance of High Supersonic Missiles: Master's Thesis. – Monterey, California, USA, 1995. – 186 p.
4. *Tejada J.* Passive Athermalization: Maintaining Uniform Temperature Fluctuations. – USA. – Photonics Handbook, May 2006. – 346 p. – (Optical design).
5. *Jamieson T.H.* Athermalization of Optical Instruments from the Optomechanical Viewpoint. – San Diego, California, USA: Optomechanical Design: Proc. of a Conf., July 1992. – 438 p.
6. *Латыев С.М.* Конструирование точных (оптических) приборов: Учеб. пособие. – СПб.: Политехника, 2007. – 580 с.
7. *Бегунов Б.Н. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И.* Теория оптических систем. – М.: Машиностроение, 1981. – 430 с.