

УДК 535.317.226

И. И. Пахомов, Д. Е. Пискунов,
А. М. Хорохоров, А. Ф. Ширанков**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ГАБАРИТНЫЙ
РАСЧЕТ ВАРИООБЪЕКТИВОВ**

Предложена методика автоматизированного габаритного расчета вариообъектива, состоящего не более чем из четырех компонентов, два из которых подвижные. Методика позволяет при заданных перепаде фокусных расстояний, диафрагменных числах и конструктивных ограничениях определить гауссовы параметры вариообъектива. В основу методики положена теория, позволяющая исследовать все многообразие панкратических систем путем изменения лишь одного обобщенного параметра.

E-mail: piskunovde@gmail.com

Ключевые слова: вариообъектив, система переменного увеличения, панкратическая система, автоматизированный расчет, габаритный расчет.

В настоящее время вариообъективы находят широкое применение в различных приложениях. В связи с этим возникает задача создания универсальной методики их автоматизированного расчета. В этой области известны работы [1–4], в которых представлены методика расчета систем переменного увеличения с оптической компенсацией (с линейной связью между перемещениями компонентов) и на ее основе методика расчета панкратических систем с механической компенсацией. В работах [5–7] приведен анализ четырех- и пятикомпонентных панкратических систем. Следует отметить, что согласно классификации, применяемой в работах [1–4], такие панкратические системы являются по сути двух- или трехкомпонентными системами переменного увеличения, поскольку перепад увеличения в них осуществляется двумя или тремя компонентами. Остальные компоненты служат для обеспечения начального увеличения или других требований, в том числе конструктивных.

В работах [2, 3] развита теория обобщенных параметров панкратических систем, позволяющая в отличие от работ [5–7] при заданном перепаде увеличения определить гауссовы параметры систем, заведомо обеспечивающие этот перепад. При этом все многообразие таких систем может быть исследовано путем изменения лишь одного обобщенного параметра. В настоящей статье на основе этой теории предложена методика автоматизированного габаритного расчета вариообъектива, состоящего не более чем из четырех компонентов, из которых

два подвижные. Эта методика предусматривает последовательное выполнение трех этапов: приведение исходной схемы вариообъектива к обобщенной двух- или трехкомпонентной панкратической системе; определение гауссовых параметров обобщенной системы; обратный переход от обобщенной системы к исходной. Множество полученных таким образом систем анализируется затем с помощью целевой функции, которая по специально разработанному критерию оценивает их качество.

Пусть требуется рассчитать вариообъектив со следующими параметрами: минимальное (f'_{\min}) и максимальное (f'_{\max}) фокусные расстояния; минимальное ($2\omega_{\min}$) и максимальное ($2\omega_{\max}$) угловые поля зрения; диафрагменные числа ($K_{f'_{\min}}$) при минимальном и ($K_{f'_{\max}}$) максимальном фокусных расстояниях; коэффициент виньетирования на краю поля k_{ω} ; минимальное расстояние d_{\min} между компонентами; максимальная длина системы L_{\max} .

С этой целью рассмотрим трех- и четырехкомпонентные системы с двумя подвижными компонентами. По возможному расположению подвижных и неподвижных компонентов можно выделить всего девять типов таких систем: 434, 424, 423, 414, 413, 412, 323, 313, 312, где первая цифра трехзначного цифрового обозначения определяет число компонентов, а две другие — номера подвижных компонентов.

Все указанные типы систем можно преобразовать к четырем обобщенным. Преобразования осуществляют по следующим правилам:

- два неподвижных компонента, расположенные рядом, заменяют одним;
- неподвижные компоненты, работающие из бесконечности, заменяют плоскостью промежуточного изображения (ППИ) — задней фокальной плоскостью, являющейся предметной для последующей части системы;
- неподвижные компоненты, расположенные перед приемником лучистой энергии (ПЛЭ), заменяют плоскостью, оптически сопряженной с ПЛЭ.

Следуя указанным правилам, системы типов 434, 423 и 323 (рис. 1, *а*) преобразуют к одной обобщенной панкратической системе с неподвижной предметной плоскостью (ПП) (рис. 1, *б*). При этом ПП для системы 434 является задняя фокальная плоскость компонентов 1 и 2, а для системы 423 и 323 — задняя фокальная плоскость первого компонента. Плоскостью изображения (ПИ) в системе 423 служит ППИ₂, являющаяся предметной для неподвижного компонента 4.

Как показано в работе [2], параметры обобщенной двухкомпонентной панкратической системы с оптической компенсацией рассчиты-

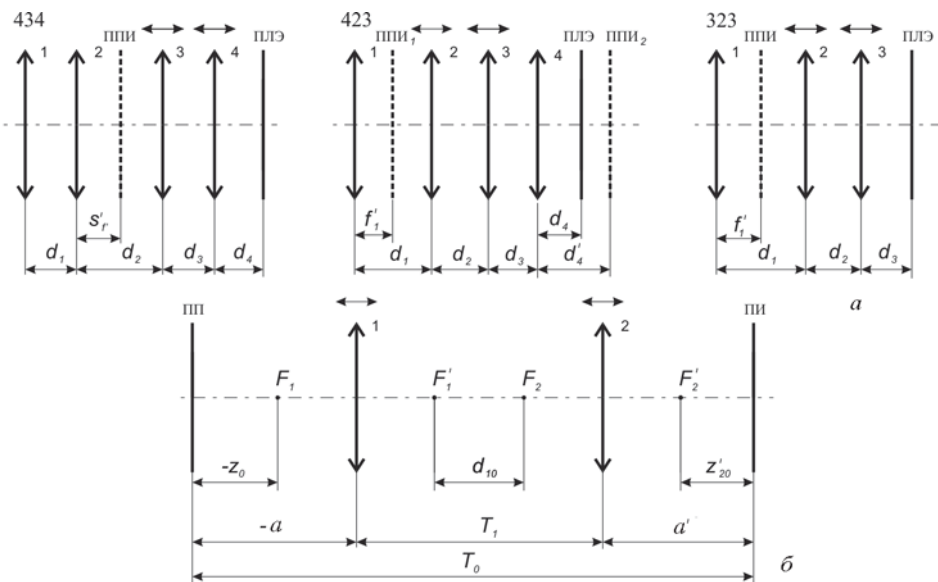


Рис. 1. Схемы вариобъективов типов 434, 423, 323:

a – исходные; *б* – обобщенная

ваются по формулам

$$\begin{aligned}
 z'_{20} &= Z'_{20}i_2; & f_2^2 &= F_2^2i_2(i_2 - i_1); \\
 z_0 &= Z_0(i_0 - i_1); & d_{10} &= D_{10}(i_2 - i_1); \\
 f_1^2 &= F_1^2(i_2 - i_1)(i_0 - i_1),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где

$$\begin{aligned}
 Z'_{20} &= \alpha y; & Z_0 &= \frac{\alpha(\gamma y - 1)}{\alpha^2 y - \gamma}; & F_2^2 &= \alpha^2 y^2 - \gamma y; \\
 D_{10} &= Z'_{20} - Z_0; & F_1^2 &= \frac{\gamma y - 1}{(\alpha^2 y - \gamma)^2}; \\
 \alpha &= \frac{1 - M}{2}; & \gamma &= \frac{1 + M}{2}.
 \end{aligned}$$

В представленных формулах i_0, i_1, i_2 характеризуют передаточные отношения между перемещениями компонентов, M – перепад фокусных расстояний, y – параметр, зависящий от i_2 и смещения ПИ

$$\Delta = \frac{m^3 - m}{m^2 + \alpha y m + \gamma y - 1},$$

где m – переменный параметр, изменяющийся в интервале $-1 \leq m \leq 1$ и определяющий положение компонентов. При $i_0 = 0$ формулы (1) принимают вид

$$\begin{aligned}
 z'_{20} &= Z'_{20}b_1i_1; & f_2^2 &= F_2^2(b_1^2 - b_1)i_1^2; \\
 z_0 &= -Z_0i_1; & d_{10} &= D_{10}(b_1 - 1)i_1; & f_1^2 &= F_1^2(1 - b_1)i_1^2,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где $b_1 = i_2/i_1$.

Увеличение β_0 в среднем положении ($m = 0$) вычисляется по формуле

$$\beta_0 = -\frac{f_1 z'_{20}}{f_2 z_0}. \quad (3)$$

Из выражений (2) и (3) можно найти значение b_1 , при котором обеспечивается заданное увеличение β_0 в среднем положении:

$$b_1 = -\frac{Z_0^2 F_2^2}{Z'_{20} F_1^2} \beta_0^2.$$

Длина системы T_0 находится по формуле

$$T_0 = -z_0 + 2f'_1 + 2f'_2 + z'_{20} + d_{10}, \quad (4)$$

из которой с учетом уравнения (2) определяется требуемое значение параметра i_1 :

$$i_1 = \frac{T_0}{2F_2 \sqrt{b_1^2 - b_1} + 2F_1 \sqrt{1 - b_1} + Z_0 + Z'_{20} b_1 + D_{10}(b_1 - 1)}.$$

Определим законы перемещения компонентов. Из расчета хода вспомогательного луча, входящего в систему под углом к оптической оси $\alpha_1 = 0$ и пересекающего первый компонент на высоте $h_1 = 1$, получаем выражение

$$1 - T_1 \bar{\varphi}_1 - a' \bar{\varphi}_1 - a' \bar{\varphi}_2 + T_1 a' \bar{\varphi}_1 \bar{\varphi}_2 = \beta, \quad (5)$$

из которого находим

$$a' = \frac{1 - \beta - T_1 \bar{\varphi}_1}{\bar{\varphi}_1 + \bar{\varphi}_2 - T_1 \bar{\varphi}_1 \bar{\varphi}_2}, \quad (6)$$

где $\bar{\varphi}_1$ и $\bar{\varphi}_2$ — оптические силы компонентов обобщенной системы, β — увеличение обобщенной системы.

Рассматривая систему в обратном ходе лучей, аналогично находим

$$a = \frac{1/\beta + T_1 \bar{\varphi}_2 - 1}{\bar{\varphi}_1 + \bar{\varphi}_2 - T_1 \bar{\varphi}_1 \bar{\varphi}_2}. \quad (7)$$

Поскольку общая длина системы $T_0 = -a + T_1 + a'$, то с учетом выражений (6) и (7) получаем

$$T_1 = \frac{T_0}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - 4A} \right),$$

где $A = \frac{\bar{\varphi}_1 + \bar{\varphi}_2}{T_0 \bar{\varphi}_1 \bar{\varphi}_2} + \frac{(\beta - 1)^2}{T_0^2 \beta \bar{\varphi}_1 \bar{\varphi}_2}$.

Таким образом, определены законы перемещения и оптические силы компонентов обобщенной системы, обеспечивающие необходимый перепад M фокусных расстояний вариообъектива. Теперь следует совершить обратный переход от обобщенной системы к исходным. Со-

отношения, определяющие переход от исходных систем к обобщенной и обратно, приведены в таблице.

В таблице и далее в тексте приняты следующие обозначения: φ_i — оптическая сила i -го компонента, d_i — расстояние между соответствующими компонентами, L — длина системы, $f'_0 = \sqrt{f'_{\min} f'_{\max}}$ — фокусное расстояние в среднем положении.

Таблица

Тип системы	Параметры оптимизации	Формулы перехода от исходных систем к обобщенной	Формулы перехода от обобщенной системы к исходным
434	φ_1 φ_2 d_1 y	$\varphi_{12} = \varphi_1 + \varphi_2 - d_1 \varphi_1 \varphi_2$ $s'_{f'} = \frac{1 - \varphi_1 d_1}{\varphi_{12}}$ $T_0 = L - d_1 - s'_{f'}$ $\beta_0 = f'_0 \varphi_{12}$	$\varphi_3 = \bar{\varphi}_1$ $\varphi_4 = \bar{\varphi}_2$ $d_2 = -a + s'_{f'}$ $d_3 = T_1$ $d_4 = a'$
423	φ_1 φ_4 d_4 y	$d'_4 = \frac{d_4}{1 - d_4 \varphi_4}$ $\beta_0 = f'_0 \varphi_1 \frac{d'_4}{d_4}$ $T_0 = L - \frac{1}{\varphi_1} + d'_4 - d_4$	$\varphi_2 = \bar{\varphi}_1$ $\varphi_3 = \bar{\varphi}_2$ $d_1 = -a + \frac{1}{\varphi_1}$ $d_2 = T_1$ $d_3 = a' - d'_4$
323	φ_1 y	$\beta_0 = f'_0 \varphi_1$ $T_0 = L - \frac{1}{\varphi_1}$	$\varphi_2 = \bar{\varphi}_1$ $\varphi_3 = \bar{\varphi}_2$ $d_1 = -a + \frac{1}{\varphi_1}$ $d_2 = T_1$ $d_3 = a'$
414	φ_1 φ_2 φ_3 y	$T_0 = L - \frac{1}{\varphi_1}$ $\beta_0 = f'_0 \varphi_1$	$\varphi_4 = \bar{\varphi}_2$ $d_2 = \frac{\varphi_2 + \varphi_3 - \bar{\varphi}_1}{\varphi_2 \varphi_3}$ $d_1 = -a + \frac{1}{\varphi_1} - a_H, a_H = \frac{\varphi_3 d_2}{\bar{\varphi}_1}$ $d_3 = T_1 + a'_H, a'_H = -\frac{\varphi_2 d_2}{\bar{\varphi}_1}$ $d_4 = a'$
413	φ_1 φ_4 d_4 y	$d'_4 = \frac{d_4}{1 - d_4 \varphi_4}$ $\beta_0 = f'_0 \varphi_1 \frac{d'_4}{d_4}$ $T_0 = L - \frac{1}{\varphi_1} + d'_4 - d_4$	$\varphi_2 = \bar{\varphi}_1$ $\varphi_3 = \bar{\varphi}_2$ $d_1 = -a + \frac{1}{\varphi_1}$ $d_2 = T_1$ $d_3 = a' - d'_4$

Тип системы	Параметры оптимизации	Формулы перехода от исходных систем к обобщенной	Формулы перехода от обобщенной системы к исходным
313	φ_1 y	$\beta_0 = f'_0 \varphi_1$ $T_0 = L - \frac{1}{\varphi_1}$	$\varphi_2 = \bar{\varphi}_1$ $\varphi_3 = \bar{\varphi}_2$ $d_1 = -a + \frac{1}{\varphi_1}$ $d_2 = T_1$ $d_3 = a'$
412	φ_1 φ_3 φ_4 d_3 d_4	$\varphi_{34} = \varphi_3 + \varphi_4 - \varphi_3 \varphi_4 d_3$ $a'_{H'} = -\frac{\varphi_3 d_3}{\varphi_{34}} \quad a_H = \frac{\varphi_4 d_3}{\varphi_{34}}$ $\Delta = d_3 + a'_{H'} - a_H$ $d'_4 = \frac{d_4 - a'_{H'}}{1 - (d_4 - a'_{H'}) \varphi_{34}}$ $\beta_0 = \frac{f'_0 \varphi_1 (d'_4 + \Delta)}{d_4 - a'_{H'}}$ $T_0 = L - \frac{1}{\varphi_1} + d'_4 - d_4$	$\varphi_2 = \bar{\varphi}_1$ $d_1 = -a + \frac{1}{\varphi_1}$ $d_2 = a' - a_H - \Delta - d'_4$
312	φ_1 φ_3 d_3	$d'_3 = \frac{d_3}{1 - d_3 \varphi_3}$ $\beta_0 = f'_0 \varphi_1 \frac{d'_3}{d_3}$ $T_0 = L - \frac{1}{\varphi_1} + d'_3 - d_{43}$	$\varphi_2 = \bar{\varphi}_1$ $d_1 = -a + \frac{1}{\varphi_1}$ $d_2 = a' - d'_3$

Аналогичным образом рассмотрим системы типов 414, 413, 313 (рис. 2, а). Эти системы приводятся к обобщенной двухкомпонентной системе с подвижной ПП (рис. 2, б). При этом во всех этих системах первый компонент заменен подвижной ППИ, находящейся в его задней фокальной плоскости. Кроме того, в системе 414 неподвижные компоненты 2 и 3 заменены одним, а в системе 413 последний компонент вместе с ПЛЭ заменен ППИ₂.

Формулы (1) для обобщенной схемы (см. рис. 2, б) принимают вид ($i_1 = 0$)

$$\begin{aligned} z'_{20} &= Z'_{20} b_2 i_0; & f_2^2 &= F_2^2 b_2^2 i_0^2; \\ z_0 &= Z_0 i_0; & d_{10} &= D_{10} b_2 i_0; \\ f_1^2 &= F_1^2 b_2 i_0^2, \end{aligned} \quad (8)$$

где $b_2 = \frac{i_2}{i_0}$.

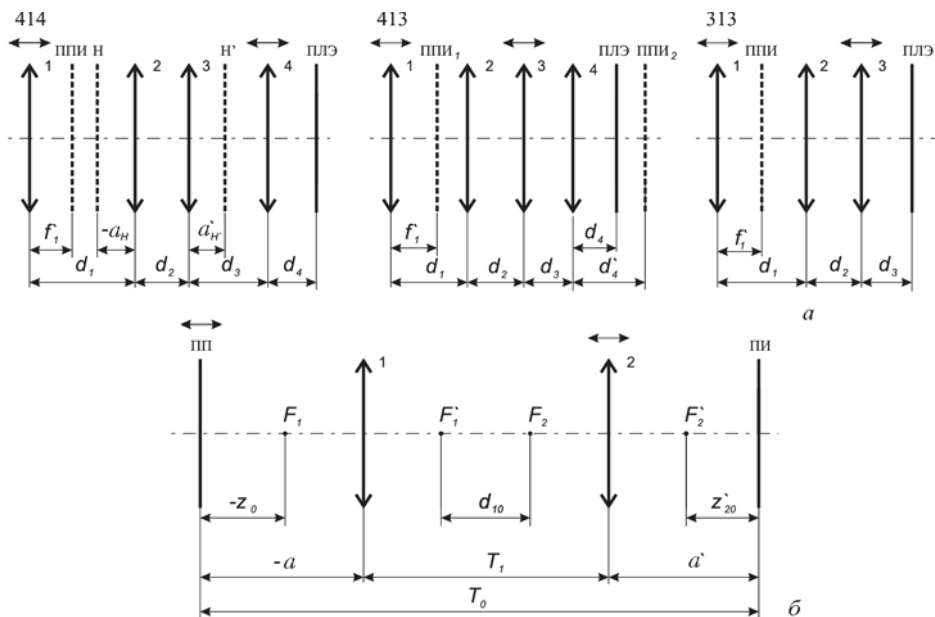


Рис. 2. Схемы вариобъективов типов 414, 413, 313:

a – исходные, b – обобщенная

Из уравнений (3) и (4) с учетом формул (8) находятся значения параметров b_2 и i_0 :

$$b_2 = \frac{Z_0^2 F_2^2}{Z'_{20} F_1^2} \beta_0^2,$$

$$i_0 = \frac{T_0}{2F_1 \sqrt{b_2} + 2F_2 b_2 + Z'_{20} b_2 - Z_0 + D_{10} b_2},$$

где β_0 и T_0 – увеличение и длина обобщенной системы в среднем положении.

Найдем законы перемещения компонентов для случая механической компенсации смещения плоскости изображения. Из уравнения (5) с учетом того, что увеличение обобщенной системы $\beta = \frac{\varphi_1}{\varphi}$, следует:

$$1 - T_1 \bar{\varphi}_1 - a' \bar{\varphi}_1 - a' \bar{\varphi}_2 + T_1 a' \bar{\varphi}_1 \bar{\varphi}_2 = \frac{\varphi_1}{\varphi}, \quad (9)$$

где φ_1 и φ – оптические силы первого компонента и всей системы.

Обозначим

$$T_{23} = T_1 + a',$$

где $T_{23} = \frac{1}{\bar{\varphi}_1} + \frac{2}{\bar{\varphi}_2} + d_{10} + z'_{20}$. Тогда уравнение (9) преобразуется к виду

$$T_1^2 - 2BT_1 + C = 0, \quad (10)$$

где $B = \frac{1 + T_{23}\bar{\varphi}_1}{2\bar{\varphi}_1}$; $C = \frac{\varphi_1 - \varphi + T_{23}\varphi(\bar{\varphi}_1 + \bar{\varphi}_2)}{\bar{\varphi}_1\bar{\varphi}_2\varphi}$.

Из выражения (10) получаем

$$T_1 = B \pm \sqrt{B^2 - C}.$$

Значение a найдем из расчета хода первого вспомогательного луча, входящего в систему под углом к оптической оси $\alpha_1 = 1$ и пересекающего первый компонент на высоте $h_1 = a$:

$$a = \frac{\varphi(T_1 + a' + T_1 a' \bar{\varphi}_2)}{\varphi_1}.$$

Соотношения, определяющие переход от исходных систем к обобщенной и обратно, представлены в таблице.

Аналогичным образом рассмотрим системы типов 412 и 312 (рис. 3, а). На рис. 3, б представлена обобщенная система. Здесь ПИ является ППИ компонентов 3 и 4 (412) и компонента 2 (312) исходной схемы.

Обобщенная система является однокомпонентной системой с подвижной ПП, из работы [1] следуют формулы для расчета ее параметров:

$$z_0 = (i_0 - i_1) Z_0; \quad z'_{10} = -i_1 Z'_{10}; \quad f_1^2 = i_1 (i_1 - i_0) F_1^2, \quad (11)$$

где $Z_0 = \frac{1 + M}{1 - M}$; $Z'_{10} = 1 - Z_0$; $F_1^2 = Z_0^2 - Z_0$.

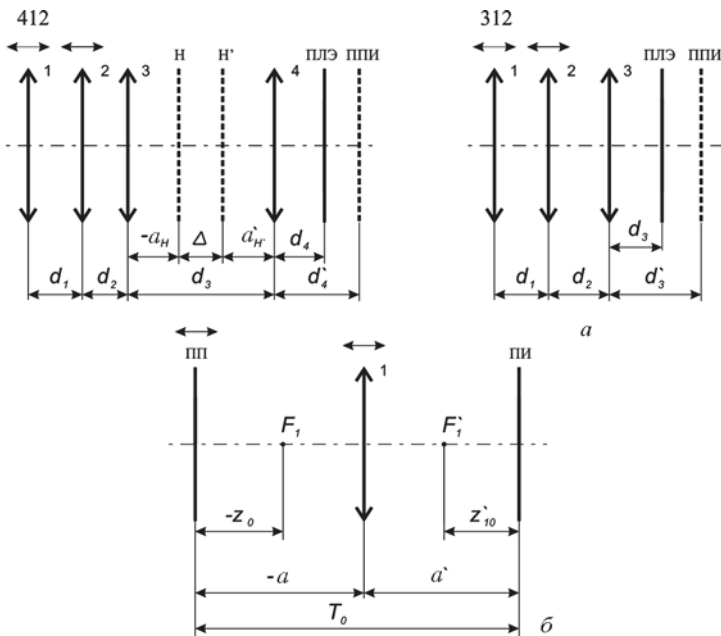


Рис. 3. Схемы вариообъективов типов 412, 312:

а — исходные, б — обобщенная

Запишем формулы (11) в следующем виде:

$$z_0 = i_0 (1 - b_3) Z_0; \quad z'_{10} = -i_0 b_3 Z'_{10}; \quad f_1^2 = i_0^2 (b_3^2 - b_3) F_1^2, \quad (12)$$

где $b_3 = \frac{i_1}{i_0}$.

Увеличение обобщенной системы в среднем положении вычисляется по формуле

$$\beta_0 = -\frac{f_1}{z_0}. \quad (13)$$

Из формулы (13) с учетом уравнений (12) следует, что для обеспечения заданного увеличения β_0 параметр b_3 должен быть равен:

$$b_3 = \frac{A_3}{A_3 - 1},$$

где $A_3 = \frac{\beta_0^2 Z_0^2}{F_1^2}$.

Длина обобщенной системы T_0 в среднем положении находится по формуле

$$T_0 = -z_0 + 2f'_1 + z'_{10},$$

откуда с учетом уравнений (12) определяется значение i_0

$$i_0 = \frac{T_0}{2F_1 \sqrt{b_3^2 - b_3} - (1 - b_3) Z_0 - b_3 Z'_{10}}.$$

Из расчета хода первого вспомогательного луча, входящего в систему под углом к оптической оси $\alpha_1 = 1$ и пересекающего первый компонент на высоте $h_1 = a$, с учетом того, что увеличение обобщенной системы $\beta = \frac{\varphi_1}{\varphi}$, определим законы перемещения компонентов:

$$a = \frac{\varphi - \varphi_1}{\varphi_1 \bar{\varphi}_1};$$

$$a' = \frac{a}{1 + a \bar{\varphi}_1},$$

где φ_1 и φ — оптические силы первого компонента и всей системы.

Соотношения, определяющие переход от исходных систем к обобщенной и обратно, приведены в таблице.

Рассмотрим систему типа 424 (рис. 4, а). Схема на рис. 4, б является обобщенной для схемы 424: ППИ, формируемая компонентом 1 исходной системы, является ПП обобщенной системы.

С точки зрения панкратических систем эта схема является трехкомпонентной с неподвижным вторым компонентом. Как показано в

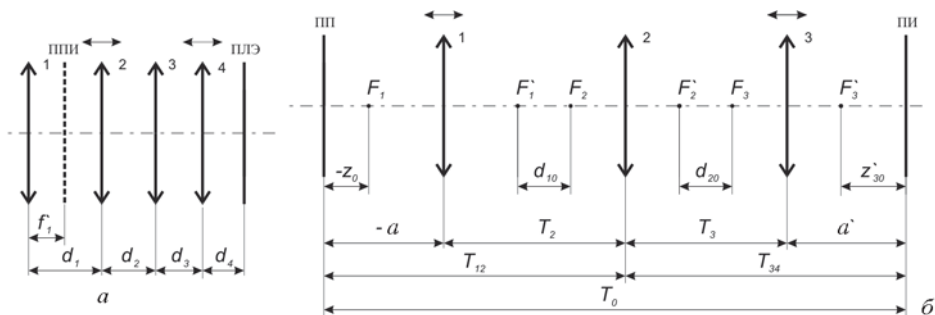


Рис. 4. Схема вариобъектива типа 424:

a — исходная, b — обобщенная

работе [3], параметры такой системы рассчитываются по формулам:

$$f_1^2 = \frac{(i_1 - i_2)(i_1 - i_0) F_1^2}{i_1^2}; \quad f_2^2 = \frac{(i_3 - i_2)(i_1 - i_2) F_2^2}{i_1};$$

$$f_3^2 = i_3(i_3 - i_2) F_3^2;$$

$$z_0 = \frac{(i_1 - i_0) Z_0}{i_1}; \quad z'_{30} = i_3 Z'_{30};$$

$$d_{10} = \frac{(i_1 - i_2) D_{10}}{i_1}; \quad d_{20} = (i_3 - i_2) D_{20},$$

где

$$F_1^2 = y(\alpha^2 y + \gamma); \quad F_2^2 = \frac{M}{(\alpha^2 y + \gamma)^2}; \quad F_3^2 = F_1^2;$$

$$Z_0 = -\alpha y; \quad Z'_{30} = -Z_0;$$

$$D_{10} = \alpha y + \frac{\frac{1+M}{2} - \frac{1-M}{2} \alpha y}{\alpha^2 y + \gamma}; \quad D_{20} = D_{10};$$

$$\alpha = \frac{(1 - \sqrt{M})^2}{2}; \quad \gamma = \frac{M - 1}{2}.$$

В представленных формулах i_0, i_1, i_2, i_3 характеризуют передаточные отношения между перемещениями компонентов, M — перепад фокусных расстояний, y — параметр, зависящий от i_3 и смещения ПИ:

$$\Delta = i_3 \frac{m^4 - m^2}{m^3 + \alpha y m^2 - (1 + \gamma y)m + y\sqrt{M}},$$

где m — переменный параметр, изменяющийся в интервале $-1 \leq m \leq 1$ и определяющий положение компонентов.

При $i_0 = 0, i_2 = 0$ формулы (14) принимают вид

$$\begin{aligned} f_1^2 &= F_1^2; & f_2^2 &= i_3 F_2^2; & f_3^2 &= i_3^2 F_3^2; \\ z_0 &= Z_0; & z'_{30} &= i_3 Z'_{30}; \\ d_{10} &= D_{10}; & d_{20} &= i_3 D_{20}. \end{aligned} \quad (15)$$

Длина T_0 обобщенной системы вычисляется по формуле

$$T_0 = -z_0 + d_{10} + d_{20} + 2f'_1 + 2f'_2 + 2f'_3 + z'_{30}. \quad (16)$$

Из формулы (16) с учетом уравнений (15) находим i_3 , при котором обеспечивается заданная длина системы T_0 :

$$i_3 = \frac{F_2^2 \pm 2F_2 \sqrt{A_4} + A_4}{(D_{20} + 2F_3 + Z'_{30})^2},$$

где $A_4 = F_2^2 - (D_{20} + 2F_3 + Z'_{30})(2F_1 + D_{10} - Z_0 - T_0)$. Как показано в работе [3], увеличение в среднем положении равно

$$\beta_0 = \pm \sqrt{|i_3|}.$$

Определим законы перемещения компонентов. Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} T_{12} &= T_2 - a; \\ T_{34} &= T_3 + a'. \end{aligned} \quad (17)$$

Из рис. 4, б следует, что $T_{12} = -z_0 + \frac{2}{\bar{\varphi}_1} + d_{10} + \frac{1}{\bar{\varphi}_2}$, $T_{34} = \frac{1}{\bar{\varphi}_2} + d_{20} + \frac{2}{\bar{\varphi}_3} + z'_{30}$.

Пусть первый компонент перемещается по закону

$$a = a_0 + t,$$

где $a_0 = z_0 - \frac{1}{\bar{\varphi}_1}$ — значение a в среднем положении, t — переменный параметр, определяющий положение первого компонента.

Из формул (17) находим

$$T_2 = T_{12} + a.$$

Из расчета хода первого вспомогательного луча, входящего в систему под углом к оптической оси $\alpha_1 = 1$ и пересекающего первый компонент на высоте $h_1 = a$, с учетом формул (17) получим:

$$a'^2 - 2Ba' + C = 0,$$

где $B = \frac{1}{2} \left(T_{34} + \frac{aT_2\bar{\varphi}_1 + T_{12}}{1 + a\bar{\varphi}_1 - (aT_2\bar{\varphi}_1 + T_{12})\bar{\varphi}_2} \right)$; $C = \frac{2B}{\bar{\varphi}_3}$.

Решая это уравнение относительно a' , находим

$$a' = B \pm \sqrt{B^2 - C}.$$

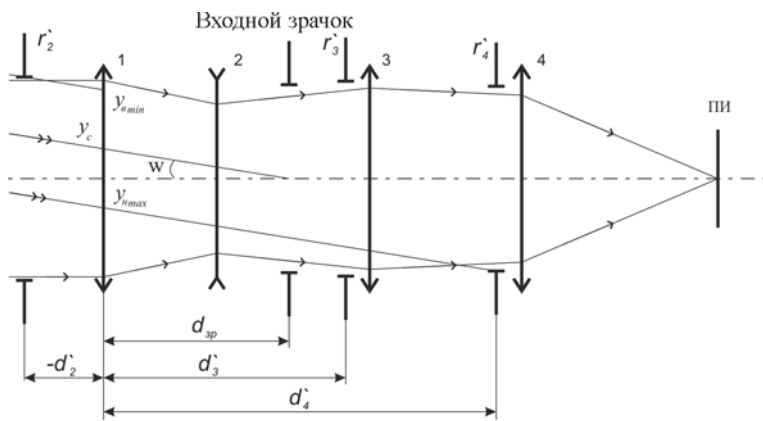


Рис. 5. Схема к расчету диаметров компонентов

Из уравнений (17) определяем T_3 по формуле

$$T_3 = T_{34} - a'.$$

Увеличение β обобщенной системы при этом изменяется по закону

$$\beta = \frac{1}{(1 - 2B + \bar{\varphi}_3 a') (1 + a \bar{\varphi}_1 - a T_2 \bar{\varphi}_1 \bar{\varphi}_2 - T_{12} \bar{\varphi}_2)}.$$

Выражения для перехода от обобщенной системы к исходной и обратно имеют вид

$$\varphi_1 = \frac{\beta_0}{f'_0}; \quad \varphi_2 = \bar{\varphi}_1; \quad \varphi_3 = \bar{\varphi}_2; \quad \varphi_4 = \bar{\varphi}_3;$$

$$d_1 = \frac{1}{\varphi_1} - a; \quad d_2 = T_2; \quad d_3 = T_3; \quad d_4 = a'.$$

Следующий этап расчета вариообъектива — определение световых диаметров компонентов, обеспечивающих требуемый размер входного зрачка, и заданного коэффициента виньетирования.

При автоматизированном проектировании расчет удобно проводить следующим образом (рис. 5). Из расчета хода вспомогательного луча, входящего в систему на высоте $h_1 = \frac{f'}{2K}$ параллельно оптической оси, определяют радиус r_i каждого i -го компонента, при котором обеспечивается заданное диафрагменное число K . Затем определяют положение d'_i и радиус r'_i изображения i -го компонента через предшествующую часть системы относительно первого компонента.

Для каждого изображения определяют координаты лучей y_{vi} и y_{ni} на первом компоненте, входящих в систему под углом поля зрения ω через верхний и нижний края изображения i -го компонента, по формулам:

$$y_{vi} = d'_i \operatorname{tg} \omega + r'_i;$$

$$y_{ni} = d'_i \operatorname{tg} \omega - r'_i,$$

находят минимальную верхнюю $y_{в\ min}$ и максимальную нижнюю $y_{н\ max}$ координаты, а также номера соответствующих компонентов i_{\min} и i_{\max} . Затем вычисляют величину Δ по формуле

$$\Delta = k_{\omega} D_{зр} - (y_{в\ min} - y_{н\ max}),$$

где $D_{зр}$ — диаметр входного зрачка.

При $\Delta > 0$ увеличивают радиусы компонентов с номерами i_{\min} и i_{\max} на величины

$$\Delta r'_{i\ max} = \Delta \frac{W_{i\ min} r_{i\ min} \varphi_{i\ min}}{W_{i\ min} r_{i\ min} \varphi_{i\ min} + W_{i\ max} r_{i\ max} \varphi_{i\ max}};$$

$$\Delta r'_{i\ min} = \Delta \frac{W_{i\ max} r_{i\ max} \varphi_{i\ max}}{W_{i\ min} r_{i\ min} \varphi_{i\ min} + W_{i\ max} r_{i\ max} \varphi_{i\ max}},$$

где $\varphi_{i\ min}$ и $\varphi_{i\ max}$ — оптические силы компонентов, $W_{i\ min}$ и $W_{i\ max}$ — весовые коэффициенты на относительные отверстия. Расчет повторяют до тех пор, пока Δ не станет равным нулю.

Далее определяют положение входного зрачка $d_{зр}$ относительно первого компонента по формуле

$$d_{зр} = \frac{y_c}{\text{tg } \omega},$$

где $y_c = \frac{y_{в\ min} + y_{н\ max}}{2}$.

Изображение входного зрачка через последующие компоненты системы определяет положение и размер апертурной диафрагмы.

Рассмотренный подход позволяет определить световые диаметры компонентов, а также размер и положение апертурной диафрагмы. Последняя при этом может оказаться подвижной, что не всегда удобно для последующего абберрационного синтеза вариообъектива. В таком случае разработчик, используя полученные результаты, может ввести в систему фиксированную апертурную диафрагму, рассматривая ее как неподвижный компонент с нулевой оптической силой. При этом положение и диаметр входного зрачка становятся известными и последующая корректировка световых диаметров компонентов не вызывает затруднений.

Важное значение для автоматизированного проектирования вариообъектива имеет выбор из множества рассчитанных вариантов наилучшего. Эта задача решается методами оптимизации путем минимизации целевой функции, учитывающей требования к разрабатываемому объективу. На этапе габаритного расчета таковыми могут быть обеспечение минимальных продольных размеров системы, максимальных диафрагменных чисел компонентов и максимальных расстояний между компонентами. При этом целевая функция может быть записана в виде суммы квадратичных функций

$$\Phi = \Phi_1^2 + \sum_{i=1}^N \Phi_{2i}^2 + \sum_{i=1}^N \Phi_{3i}^2,$$

где i – номер компонента в системе, $i = 1, \dots, N$ и $\Phi_1 = W_1 L$, $\Phi_{2i} = W_{2i} K_i^{-1}$ и $\Phi_{3i} = W_{3i} d_i^{-1}$ – оптимизируемые функции (W_1, W_{2i}, W_{3i} – соответствующие весовые коэффициенты).

В ряде случаев при проектировании вариообъектива задают ограничения на максимальную длину системы L_{\max} и минимально допустимое расстояние d_{\min} между соседними компонентами. В этом случае в целевую функцию целесообразно добавить штрафную функцию

$$\Phi_4 = e^{W_4(L-L_{\max})} + \sum_{i=1}^N e^{W_{5i}(d_{\min}-d_i)},$$

где W_4, W_{5i} – весовые коэффициенты.

Параметры, по которым проводится оптимизация, представлены в таблице и тексте статьи для каждой из девяти систем.

На основе предложенных методов были разработаны программы для расчета четырехкомпонентных систем с двумя подвижными компонентами (законы перемещения компонентов представлены на рис. 6). В качестве примера с помощью этих программ был рассчитан

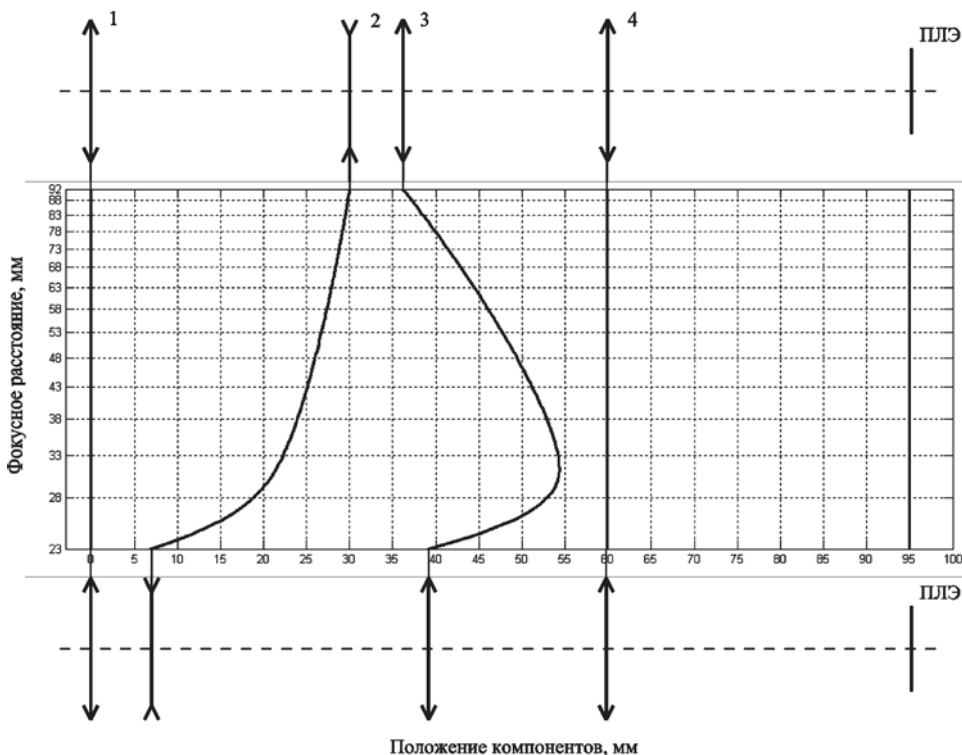


Рис. 6. Законы перемещения компонентов системы типа 423

вариообъектив типа 423 с параметрами:

$$f'_{\min} = 23 \text{ мм}; f'_{\max} = 92 \text{ мм}; 2\omega_{\min} = 13^\circ; 2\omega_{\max} = 50^\circ; k_\omega = 0,5.$$

$$K_{f'_{\min}} = 2,8; K_{f'_{\max}} = 5,6; d_{\min} = 5 \text{ мм}; L_{\max} = 95 \text{ мм}.$$

Результаты расчетов следующие. Фокусные расстояния компонентов: $f'_1 = 54,95 \text{ мм}$, $f'_2 = -16,72 \text{ мм}$, $f'_3 = 35,46 \text{ мм}$, $f'_4 = 69,93 \text{ мм}$; относительные отверстия: $K_1^{-1} = 1 : 1,6$, $K_2^{-1} = 1 : 1,4$, $K_3^{-1} = 1 : 1,4$, $K_4^{-1} = 1 : 1,4$.

Таким образом, изложенные методы позволяют рассчитать гауссовы параметры вариообъективов и определить оптимальное положение входного зрачка при заданном перепаде фокусных расстояний, заданных диафрагменных числах и конструктивных ограничениях. Данные методы легко алгоритмируются, алгоритмы отличаются хорошей сходимостью, а их программные реализации — быстротой расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пахомов И. И. Панкратические системы. – М.: Машиностроение, 1976. – 160 с.
2. Пахомов И. И. Расчет двухкомпонентных систем переменного увеличения // Оптико-механическая промышленность. – 1981. – № 5. – С. 15–19.
3. Пахомов И. И. Трехкомпонентные панкратические системы с механической компенсацией // Оптико-механическая промышленность. – 1982. – № 6. – С. 22–25.
4. Пахомов И. И. Трехкомпонентные системы переменного увеличения с линейной зависимостью между перемещениями компонентов // Оптические и оптико-электронные приборы: сб. статей. – М.: Гос. науч.-технич. изд-во Оборонгиз, 1962. – Вып. 110. – С. 68–99.
5. T a n a k a К. Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 1: Four-component type // Applied Optics. – 1982. – Vol. 21. No. 12. – P. 2174–2183.
6. T a n a k a К. Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 2: Generalization of Yamaji Type V // Applied Optics. – 1982. – Vol. 21. No. 22. – P. 4045–4053.
7. T a n a k a К. Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 3: Five-component type // Applied Optics. – 1983. – Vol. 22. No. 4. – P. 541–553.

Статья поступила в редакцию 16.02.10



Иван Иванович Пахомов родился в 1930 г., окончил в 1954 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, заслуженный профессор кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 130 научных работ в области оптики, физики лазеров, расчета оптических систем лазерных приборов, оптических систем переменного увеличения.

I.I. Pakhomov (b. 1930) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1954. D. Sc. (Eng.), honoured professor of “Laser and Optical and Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 130 publications in the field of optics, laser physics, design of optical systems for laser devices, optical systems with zoom.

Дмитрий Евгеньевич Пискунов родился в 1985 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2008 г. Аспирант кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области расчета оптических систем.



D.Ye. Piskunov (b. 1985) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2008. Post-graduate of “Laser and Optic and Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of computation of optic systems.

Алексей Михайлович Хорохоров родился в 1945 г., окончил в 1968 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области оптико-электронного приборостроения.

A.M. Khorokhorov (b. 1945) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1968. Ph. D. (Eng.), senior researcher of “Laser and Optic and Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 70 publications in the field of optic and electronic devices engineering.

Александр Федорович Ширанков родился в 1950 г., окончил в 1974 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник НИИ “Радиоэлектроника и лазерная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Лауреат премии Ленинского комсомола, награжден медалью С.Э. Фриша Оптического общества им. Д.С. Рождественского. Автор 150 научных работ в области оптоэлектроники и лазерной техники.

A.F. Shirankov (b. 1950) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1974. Ph. D. (Eng.), leading researcher of “Radio Electronics and Laser Technology” research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Winner of Lenin’s Komsomol Prize. Recipient of Frish Medal of Optical Society n.a. D.S. Rozhdestvensky. Author of 150 publications in the field of optoelectronics and laser technology.