

И.И. Пахомов, Д.Е. Пискунов,
А.М. Хорохоров

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ЧИСЛОМ ПОДВИЖНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Предложена методика автоматизированного габаритного расчета систем переменного увеличения, состоящих из произвольного числа подвижных и неподвижных компонентов. Методика предусматривает разложение законов перемещения компонентов по базисным функциям с последующим определением коэффициентов разложения.

E-mail: piskunovde@gmail.com; a.horohorov@yandex.ru

Ключевые слова: *вариообъектив, система переменного увеличения, панкратическая система, габаритный синтез.*

Габаритный синтез является важным этапом проектирования систем переменного увеличения (СПУ), поскольку именно от качества габаритного синтеза зависят компактность системы, сложность ее конструкции и трудоемкость последующего абберрационного синтеза компонентов. На этапе габаритного синтеза определяются фокусные расстояния и относительные отверстия компонентов, длина СПУ, законы перемещения компонентов, а также другие параметры, обеспечивающие необходимый перепад увеличений и относительное отверстие СПУ при заданных ограничениях на положение компонентов.

Развитие методов расчета СПУ отражено в многочисленных публикациях [1—5 и др.]. Общим недостатком предлагаемых методов является то, что они применимы для расчета СПУ с двумя-тремя подвижными компонентами. Однако существует ряд задач, для решения которых может потребоваться и большее число подвижных компонентов.

В общем случае задача расчета СПУ с произвольным числом подвижных и неподвижных компонентов сводится к решению системы нелинейных уравнений

$$P(d, \varphi) = P_k, \quad (1)$$

где P — вектор параксиальных величин, которые должны быть равны предписанным значениям (например, фокусное расстояние и длина системы); d — вектор расстояний между компонентами; φ — вектор оптических сил компонентов; P_k — вектор предписанных значений параксиальных величин для k -й позиции.

Например, для двухкомпонентной СПУ (рис. 1) выражение (1) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} d_1 + d_2 + d_3 &= L; \\ 1 - d_2\varphi_1 - d_3\varphi_1 - d_3\varphi_2 + d_2d_3\varphi_1\varphi_2 &= \beta; \\ 1 - d_1\varphi_1 - d_1\varphi_2 - d_2\varphi_2 + d_1d_2\varphi_1\varphi_2 &= 1/\beta, \end{aligned} \quad (2)$$

где d_1, d_3 — расстояния от предметной плоскости (ПП) до первого компонента и от последнего компонента до плоскости изображения (ПИ); d_2 — расстояние между компонентами; φ_i — оптическая сила i -го компонента обобщенной СПУ; L, β — длина и увеличение СПУ соответственно.

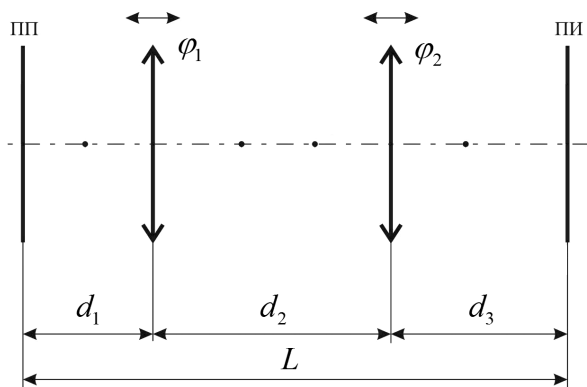


Рис. 1. Схема двухкомпонентной СПУ

В большинстве работ при аналитическом решении системы уравнений (1) полагают, что вектор φ известен, т. е. задача сводится к определению законов перемещения компонентов. Один из подходов к решению системы уравнений (1) с известным вектором φ — это ее преобразование к степенному уравнению. Для определения законов перемещения двухкомпонентной СПУ приведем систему уравнений (2) к квадратному уравнению:

$$d_2^2 - Ld_2 + L^2 A = 0, \quad (3)$$

где $A = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{L\varphi_1\varphi_2} + \frac{(\beta - 1)^2}{L^2\beta\varphi_1\varphi_2}$.

Решение уравнения (3) имеет следующий вид:

$$d_2 = \frac{L}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - 4A} \right). \quad (4)$$

Подставив решение (4) в систему уравнений (2), определим d_1 и d_3 .

Для трехкомпонентной СПУ необходимо решить уравнение шестой степени, что вызывает определенные проблемы. На практике полагают, что один из компонентов движется по заданной траектории, например по линейной. В этом случае уравнение шестой степени можно свести к квадратному уравнению, однако с помощью такого подхода сложно исследовать все многообразие решений и подобрать оптимальную СПУ.

Таким образом, даже в упрощенном виде (вектор φ известен) задача расчета СПУ решена аналитически для частных случаев: для СПУ с двумя и тремя перемещающимися компонентами. Для расчета СПУ с произвольным числом подвижных компонентов применяют численные методы.

В случае решения численными методами системы уравнений (1) с известным вектором φ возникает проблема согласования корней, т. е. решения для разных k позиций могут лежать на разных кривых. В качестве примера рассмотрим типичную ситуацию для двухкомпонентной СПУ (рис. 2). У данной СПУ имеется два решения (4). При решении численными методами системы уравнений (1), например для трех позиций, может возникнуть ситуация, когда две позиции 1 и 2 лежат на одной кривой, а позиция 3 — на другой. В этом случае позиции 1, 2 и 3 невозможно соединить плавной кривой, т. е. обеспечить плавное изменение увеличения β .

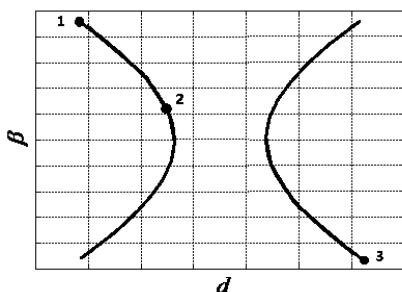


Рис. 2. Законы перемещения компонентов, полученные численными методами

В работе [6] для решения данной проблемы предлагается выбрать вектор изменения параксиальных величин для двух соседних позиций бесконечно малым, $\|P_{k+1} - P_k\| \rightarrow 0$, и затем для определения d минимизировать функцию:

$$\Phi(d) = [P(d) - P_k]^T [P(d) - P_k]. \quad (5)$$

На практике же величина $\|P_{k+1} - P_k\|$ имеет конечное значение, и при неправильном ее выборе нет гарантии, что решения будут лежать на разных кривых. Кроме того, такой подход приводит к большим вычислительным затратам, поскольку число позиций $K \rightarrow \infty$ при $\|P_{k+1} - P_k\| \rightarrow 0$. Существенным недостатком метода является то, что он не позволяет проводить оптимизацию по φ , так как каждое реше-

ние d , найденное с помощью минимизации (5), зависит от предыдущего. Увеличение числа K позиций приводит к увеличению числа неизвестных d , поскольку d зависит от номера позиции k . Ниже приведен метод, свободный от указанных недостатков.

Каждое расстояние d вектора d есть функция от увеличения СПУ: $d = d(\beta)$, либо в параметрическом виде $d = d(m)$, $\beta = \beta(m)$, где m — параметр, определяющий положение компонентов. Представим указанные функции в виде разложения по базисным функциям:

$$d(x) = \sum_{i=0}^N a_i F_i(x), \quad (6)$$

где N — число членов разложения; a_i — коэффициенты разложения; $F_i(x)$ — базисная функция i -го порядка; x — аргумент базисной функции, x может быть равен m или β в зависимости от того, что более удобно для каждой конкретной задачи.

Подставив разложение (6) в систему уравнений (1), получим

$$P(a, \varphi) = P(x). \quad (7)$$

В результате вместо вектора расстояний d необходимо определить коэффициенты a разложения по базисным функциям. При решении системы уравнений (7) численными методами не возникает проблема согласования корней, так как они заведомо принадлежат одной кривой. Увеличение числа K позиций не приводит к увеличению числа неизвестных. Кроме того, появляется возможность оптимизировать оптические силы φ в отличие от метода, предложенного в работе [6].

Таким образом, для расчета СПУ с произвольным числом подвижных и неподвижных компонентов необходимо: выбрать исходную систему, представить законы изменений расстояний между компонентами в виде разложения по базисным функциям, составить систему уравнений (7), численными методами определить оптические силы φ компонентов и коэффициенты разложения a .

В качестве исходной может быть выбрана СПУ с двумя перемещающимися компонентами или группами компонентов, рассчитанная в соответствии с методикой, предложенной в работах [7, 8]. Система уравнений (7) может быть получена с помощью расчета хода вспомогательных лучей.

Отметим, что предлагаемый метод пригоден для расчета СПУ с любым способом компенсации смещения плоскости изображения. Например, если выбрать степенные функции в качестве базисных и

ограничиться первым порядком в разложении (6), то получим СПУ с линейной связью между перемещениями компонентов. Расстояния между компонентами в данном случае

$$d_j = a_{0j} + a_{1j}m, \quad (8)$$

где d_j — расстояние между j -м и $(j+1)$ -м компонентами в положении, определяемом параметром m ; a_{1j} , a_{0j} — коэффициенты разложения. Заметим, что отношение a_{1j}/a_{1h} есть не что иное, как передаточное отношение между j -м и h -м компонентами системы.

Если при определении законов перемещения потребовать, чтобы выполнялось условие $a_{1j}/a_{1h} = 1$, то получим СПУ с жестко связанными подвижными компонентами.

Для перехода к СПУ с механической компенсацией число N членов разложения должно быть более одного. Выбор N определяется степенью уравнения, к которому может быть преобразована система уравнений (7), а значит, и числом подвижных компонентов. Кроме того, N зависит от вида базисных функций. Практика расчетов показывает, что при использовании разложения по полиномам Чебышева требуется меньшее значение N по сравнению с другими базисными функциями.

В качестве примера рассмотрим расчет семикомпонентной СПУ со вторым, четвертым и шестым подвижными компонентами. В вектор \mathbf{P} параксиальных величин включим длину и фокусное расстояние СПУ:

$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} L(\mathbf{a}, \boldsymbol{\varphi}) \\ f'(\mathbf{a}, \boldsymbol{\varphi}) \end{bmatrix}$. Вектор предписанных значений паракси-

альных величин запишем в виде функционала от m : $\mathbf{P}(m) = \begin{bmatrix} L(m) \\ f'(m) \end{bmatrix}$,

где $m = 0 \dots 1$. Позицию, в которой $m = 0$, будем считать базовой. Допустим, что при $m = 0$ требуется обеспечить фокусное расстояние 1 мм и длину СПУ 11 мм. В этом случае вектор предписанных значений параксиальных величин в базовой позиции примет вид

$\mathbf{P}(0) = \begin{bmatrix} 11 \\ 1 \end{bmatrix}$. Для обеспечения постоянства длины системы и пяти-

кратного перепада фокусных расстояний положим $L(m) = 11$, $f'(1) = 5$. К системе уравнений (7) добавим условие ограничения минимального расстояния между компонентами: $d > 0,3$ мм. Выбрав в качестве базисных функций степенные и ограничиваясь пер-

вым порядком разложения, после решения системы уравнений (7) численными методами с указанными ограничениями получим СПУ с линейной связью между перемещениями компонентов (рис. 3, а). Потребовав, чтобы отношение коэффициентов разложения при t равнялось единице, получим СПУ с жестко связанными подвижными компонентами (рис. 3, б).

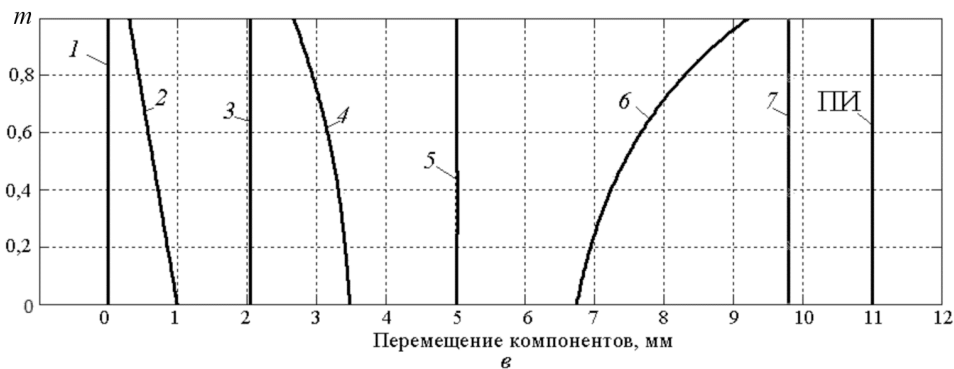


Рис. 3. Законы перемещения компонентов семикомпонентного варио-объектива:

a — линейная компенсация; b — жесткая связь; v — механическая компенсация

Рассчитанные СПУ ограничены по своим возможностям, так как не обеспечивают неподвижность плоскости изображения во всем диапазоне изменения фокусного расстояния. Тем не менее они могут представлять интерес для практики в случаях, когда сложная механическая обвязка недопустима по каким-либо причинам. ПИ рассчитанных СПУ смещается на небольшую величину Δ . Нелинейные законы перемещения компонентов позволяют обеспечить неподвижность ПИ. Ограничиваясь четвертым порядком в разложении функции расстояния по степенному базису, получим СПУ с механической компенсацией (рис. 3, в). На рис. 4 представлены зависимости смещения Δ ПИ и изменение фокусного расстояния f' от параметра t для СПУ с жесткой (жст) и линейной (лин) связью между перемещениями компонентов, а также с механической (мех) компенсацией смещения ПИ. Оптические силы и коэффициенты разложения функций расстояний между компонентами представлены в таблице.

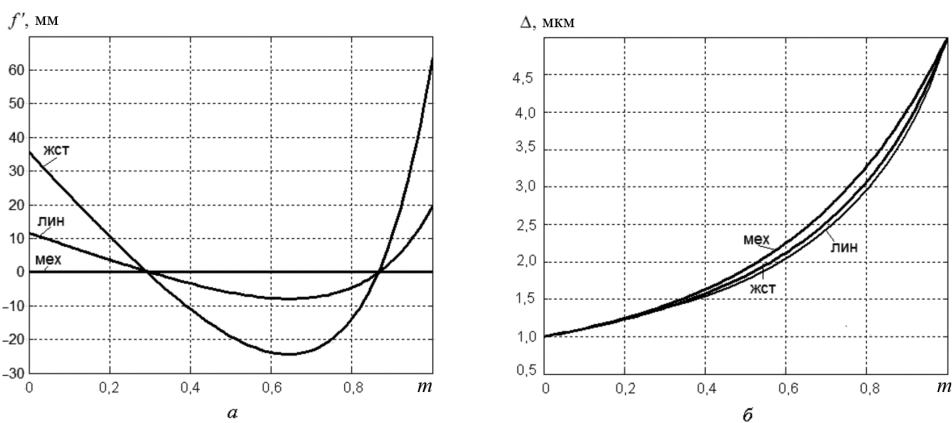


Рис. 4. Характеристики семикомпонентного вариообъектива:
 a — изменение фокусного расстояния; b — смещение ПИ

Параметры компонентов систем переменного фокусного расстояния

Номер компонента	Жесткая связь			Линейная компенсация			Механическая компенсация					
	a_0	a_1	φ	a_0	a_1	φ	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	φ
1	1,585	0,802	0,265	2,176	0,467	0,271	0,989	-0,692	0	0	0	0,132
2	1,072	-0,802	-0,254	0,884	-0,469	-0,315	1,055	0,692	0	0	0	0,147
3	0,552	0,802	-0,282	0,920	-0,588	-0,358	1,434	-0,313	0,044	-0,895	0,352	-0,243
4	0,932	-0,802	-0,277	0,809	0,588	-0,419	1,546	0,276	0,257	0,255	0,024	-0,246
5	1,059	0,802	-0,273	0,675	0,897	-0,396	1,724	0,851	0,645	0,725	0,253	-0,228
6	3,175	-0,802	-0,264	3,825	-0,899	-0,360	3,053	-0,813	-0,953	-0,071	-0,638	-0,223
7	—	—	0,591	—	—	0,784	—	—	—	—	—	1,008

Как видно на рис. 4, фокусное расстояние всех трех СПУ изменяется в зависимости от параметра t примерно одинаково, при этом ПИ в случае жесткой и линейной связей между перемещениями компонентов смещается приблизительно на 60 и 20 мкм соответственно, а в случае механической компенсации ПИ остается практически неподвижной.

Увеличение числа подвижных компонентов может улучшить характеристики исходной СПУ. Проиллюстрируем это утверждение примером.

Согласно методике [7, 8], рассчитаем пятикомпонентную СПУ со вторым и четвертым подвижными компонентами. СПУ имеет примерно четырехкратный перепад фокусных расстояний и длину 21,5 мм. Фокусные расстояния компонентов СПУ с первого по пятый равны соответственно 22,0, -6,1, 6,2, -6,0 и 5,5 мм. Законы перемещения компонентов представлены на рис. 5, *а*. Выбрав данную СПУ в качестве исходной, примем, что у нее подвижны все компоненты, кроме первого. Разложим законы перемещения каждого компонента

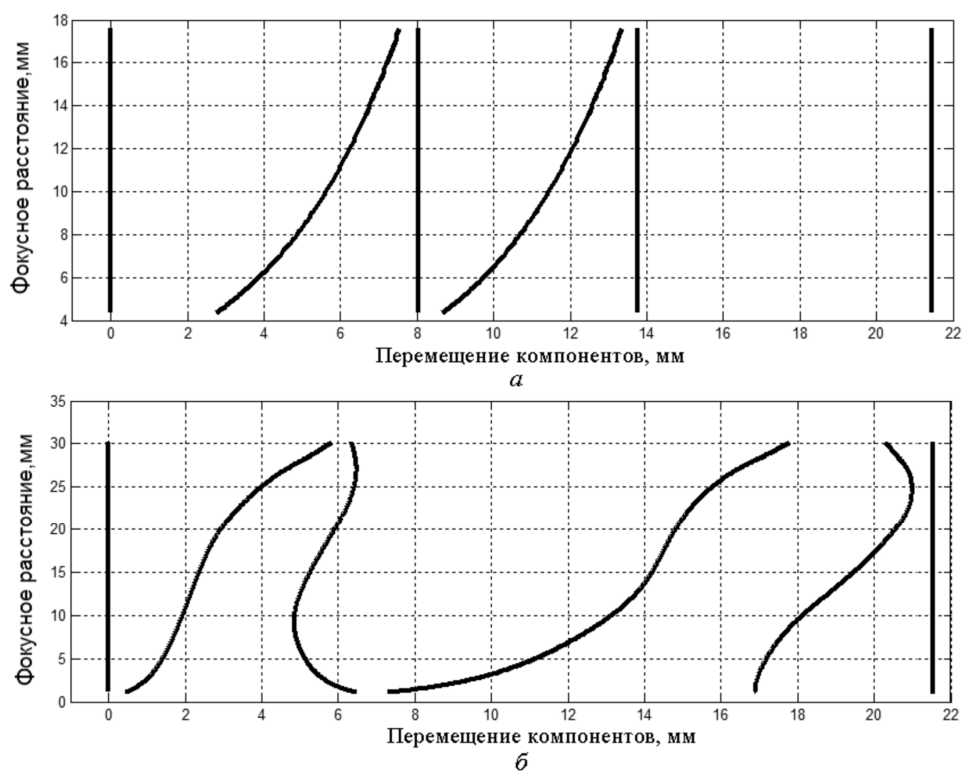


Рис. 5. Законы перемещения компонентов пятикомпонентного варио-объектива:

а — исходного четырехкратного; *б* — тридцатикратного

в степенной ряд. Составим систему уравнений (7) таким образом, чтобы сохранялась длина СПУ 21,5 мм. Применяв предлагаемый метод, получим новую СПУ, законы перемещения компонентов которой представлены на рис. 5, б.

Перепад фокусных расстояний полученной СПУ превышает тридцатикратный. Фокусные расстояния компонентов СПУ равны 11,8, -4,1, 5,7, -3,2 и 3,5 мм.

Кроме расширения перепада увеличений (фокусных расстояний) увеличение числа подвижных и неподвижных компонентов может обеспечить их меньшие относительные отверстия, получить требуемые законы перемещения, улучшить другие параметры и характеристики СПУ.

С помощью предлагаемого метода рассчитан вариообъектив с тридцатикратным перепадом фокусных расстояний. Параметры вариообъектива приведены ниже:

Фокусное расстояние, мм	5,7...172
Размер приемника излучения, мм	2,4×1,8
Диафрагменное число при фокусном расстоянии, мм:	
минимальном	2,8
максимальном	5,3
Падение освещенности на краю поля, %	< 25
Длина системы, мм	159
Задний фокальный отрезок, мм.....	> 15
Коэффициент передачи модуляции на частоте 150 линий/мм, %, для позиции:	
широкопольной.....	> 30
телепозиции	> 20
Дисторсия, %, для позиции:	
широкопольной.....	< ±5
телепозиции	< ±1
Число подвижных компонентов	4
Длина волны / весовой коэффициент, нм/отн. ед.....	656,3 / 10 587,6 / 27 546,1 / 29 486,1 / 23 435,8 / 11

Объектив состоит из пяти групп компонентов, четыре из которых подвижные (рис. 6). Неподвижная апертурная диафрагма (АД) расположена между четвертой и пятой группами.

Законы перемещения групп компонентов вариообъектива представлены на рис. 7 (точками обозначены позиции, для которых проводилась оптимизация).

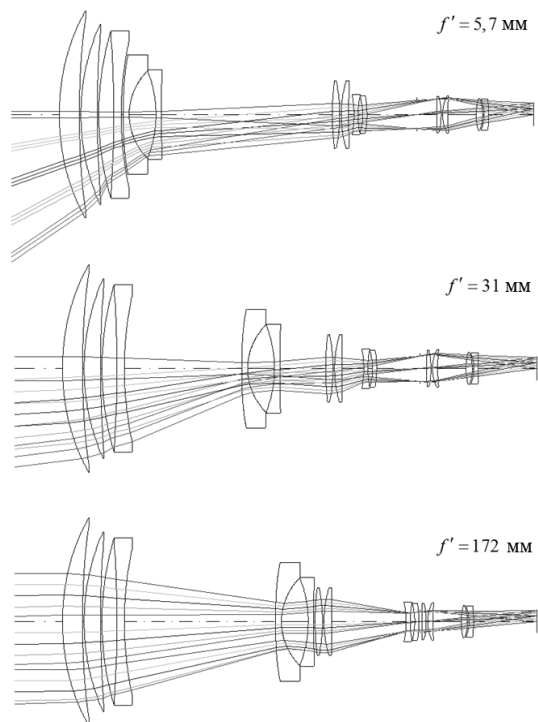


Рис. 6. Оптические схемы и ход лучей вариообъектива с тридцатикратным перепадом фокусных расстояний при f' , равном 5,7; 31 и 172 мм

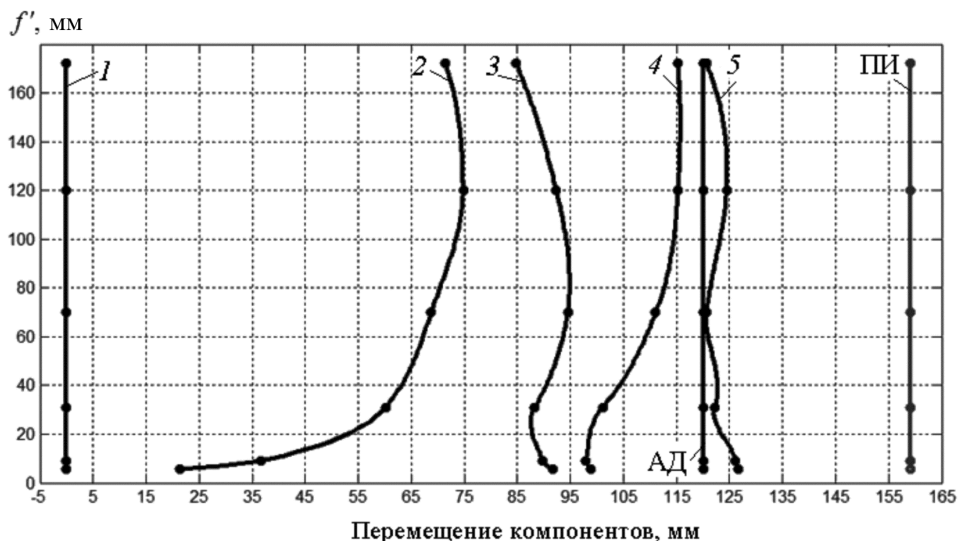


Рис. 7. Законы перемещения компонентов вариообъектива с тридцатикратным перепадом фокусных расстояний

Рассчитанная СПУ по своим характеристикам не уступает мировым аналогам, что подтверждает эффективность предлагаемого метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tanaka K. Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 1: Four-component type // *Applied Optics*. – 1982. – Vol. 21. – No. 12. – P. 2174–2183.
2. Tanaka K. Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 2: Generalization of Yamaji Type V // *Applied Optics*. – 1982. – Vol. 21. – No. 22. – P. 4045–4053.
3. Tanaka K. Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 3: Five-component type // *Applied Optics*. – 1983. – Vol. 22. – No. 4. – P. 541–553.
4. Kryszczyński T. Paraxial determination of the general four-component zoom system with mechanical compensation // *Proc. SPIE*. – 1995. – Vol. 2539. – P. 180–191.
5. ChunKan T. Varifocal differential equation theory of zoom lens // *Proc. SPIE*. – 1995. – Vol. 2539. – P. 168–179.
6. Ivanov A. V. Automatic computation of displacement of zoom lens movable components // *Proc. SPIE*. – 1999. – Vol. 3780. – P. 191–198.
7. Автоматизированный габаритный расчет вариообъективов / Пахомов И.И., Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф. // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. – 2010. – № 3. – С. 26–41.
8. Автоматизированный габаритный расчет вариообъективов / И.И. Пахомов, Д.Е. Пискунов, М.Е. Фролов, А.М. Хорохоров, А.Ф. Ширанков // *Сб. трудов IX Международной конференции «Прикладная оптика-2010»*. – СПб., 2010. – Т. 2. – С. 316–320.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012