УДК 535.31

СИНТЕЗ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ. ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ

М. Г. Шпякин

Показано, что четырехкомпонентные системы с различной кинематикой могут быть синтезированы из более простых трехкомпонентных схем, построенных на основе одного перемещающегося компонента. Предложенный метод определения параксиальных элементов систем весьма удобен на практике и прост, так как сводится в большинстве случаев к решению линейных уравнений.

Рассмотрим сначала схемы с U-образным профилем кулачковой направляющей, в которых третий компонент имеет возвратно-поступательное движение. В этих системах необходимо следить, чтобы значение d_2 было всегда положительным и достаточной величины для исключения потерь кратности изменения фокусного расстояния M при введении толщин из-за невозможности совмещения главных плоскостей в реальных втором и третьем компонентах.

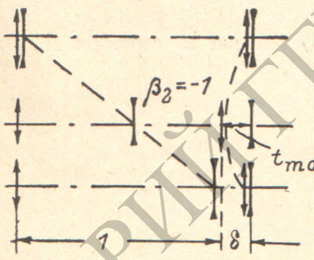

Рис. 1. Система с U-образным профилем кулачка.

Если предположить, что минимальной величины d_2 достигает для второго крайнего положения компонентов, тогда достаточно в исходной трехкомпонентной системе отодвинуть третий компонент на величину δ (рис. 1) и на эту же величину увеличить его фокусное расстояние

$$\bar{f}_3'=f_3'+\delta=f_1'+\delta,$$

сохраняя неизменным положение его переднего фокуса F_3, и расщепление на две части осуществить уже в преобразованном третьем компоненте.

В статье [1] показано, что в четырехкомпонентных насадках минимуму величины d_2 соответствуют следующие соотношения для увеличений второго и третьего компонентов:

$$\beta_2=\frac{1}{\beta_3} \tag{1}$$

и

$$\beta_2=-\frac{1}{\beta_3}. \tag{2}$$

Первое из них справедливо для случая $\varphi_3>0$, второе для $\varphi_3<0$.

Приведем еще одно очевидное и потребующееся в дальнейшем соотношение

$$d_2=s_2'-s_3, \tag{3}$$

где

$$s_2=\frac{1-\beta_2}{\beta_2}f_2' \text{ и } s_3'=(1-\beta_3)f_3'.$$

Снова рассмотрим два случая.

1. $\varphi_3 > 0$. Полагая $d_{2\min} = \delta$ во втором крайнем положении и имея в виду, что в этом случае $\beta_2 = -\sqrt{M}$, из (1) и (3) получаем выражение

$$f_3' = \frac{\delta}{1+\sqrt{M}} - f_2' \quad \text{или} \quad \varphi_3 = \frac{\delta(1-\sqrt{M}) - \sqrt{M}}{1-M}. \tag{4}$$

Величина φ_4, определяемая из (2), равна

$$\varphi_4 = \frac{\varphi_1}{1+\delta\varphi_4} - \varphi_3. \tag{5}$$

В более общем случае минимальная величина $d_{2\min}$ может быть достигнута при промежуточных увеличениях системы, тогда во втором крайнем положении $d_2^{\mathrm{II}} > d_{2\min}$ и для величины δ, на которую необходимо отодвинуть третий компонент в исходной системе, справедливо неравенство $\delta > d_{2\min}$.

При $T = T_2 + T_3$, принимая во внимание выражение для T из [2] и (1), можно получить соотношение

$$f_2' + f_3' = -\frac{\beta_2}{(\beta_2 - 1)^2} T. \tag{6}$$

С другой стороны, из (1) и (3) следует, что

$$f_2' + f_3' = \frac{d_{\min}}{1-\beta_2}. \tag{7}$$

И, наконец, используя известное [2] соотношение $T = 1 - f_1' - f_4'$, справедливое для четырехкомпонентных афокальных систем, в рассматриваемом нами случае имеем

$$T = 1 + \delta - f_1' - \frac{(f_1' + \delta) f_3'}{f_3' - f_1' + \delta}. \tag{8}$$

Из выражений (6)—(8) можно получить следующее квадратное уравнение для нахождения f_3':

$$f_3'^2 + P f_3' - d_{\min}^2 = 0, \tag{9}$$

$$P = f_2' - d_{2\min} - \frac{B}{A} + \frac{d_{2\min}^2}{A}, \quad A = f_1' + \delta, \quad B = 1 + \delta - f_1'.$$

Дальнейший переход к φ_3 и φ_4 тривиален.

2. $\varphi_3 < 0$. Также приняв, что во втором крайнем положении $d_{2\min} = \delta$, из (2) и (3) получим

$$f_3' = \frac{\delta}{1-\sqrt{M}} + \frac{\sqrt{M}+1}{\sqrt{M}-1} \quad \text{или} \quad \varphi_3 = \frac{(\sqrt{M}-1)^2}{\delta(1-\sqrt{M}) - \sqrt{M}}. \tag{10}$$

Если принять $\delta = 0$ (этот крайний случай здесь возможен в отличие от системы с положительным третьим компонентом), формулы (10) упрощаются

$$f_3' = \frac{\sqrt{M}+1}{\sqrt{M}-1} f_2' \quad \text{или} \quad \varphi_3 = \frac{(\sqrt{M}-1)^2}{\sqrt{M}}, \tag{11}$$

φ_4 по-прежнему определяется из (5).

Для случая с $\varphi_3 < 0$, когда минимальной величины d_2 достигает при промежуточных увеличениях, формулы для определения параксиальных элементов четырехкомпонентной насадки опубликованы в статье [1].

Для обоих рассматриваемых вариантов системы максимальной величины $t_{\max}$ смещение третьего компонента достигает при $\beta_2 = -1$; оно может быть вычислено по следующим формулам:

$$t_{\max} = x_3' - x_{3\max}', \tag{12}$$

x'_{3max} соответствует $\beta_2 = -1$ и вычисляется из выражения [2]

$$x'_3 = Z - \sqrt{Z^2 - f'^2_3},$$

где

$$Z = \frac{T}{2} - f'_3 - f'_2 + \frac{x_2}{2} + \frac{f'^2}{2x_2},$$

$$T = 1 + \delta - f'_1 - f'_4,$$

при этом $x_2 < 0$, так как на всем интервале изменения увеличения $\beta_2 < 0$.

Четырехкомпонентные системы с монотонным профилем кулачка

В системах с U-образным профилем кулачка третий компонент при изменении фокусного расстояния меняет на противоположное направление своего движения. Из-за разной ширины направляющих пазов кулачка это приводит к люфтам при движении компонента и, как следствие, к сдвигу плоскости изображения при изменении увеличения системы. Поэтому несомненный интерес представляют объективы с монотонным профилем кулачка, для которых $\partial d_3/\partial d_2$ сохраняет неизменным свой знак на всем интервале изменения увеличений.

Для этих систем также рассмотрим два случая в зависимости от знака φ_3.

1. $\varphi_3 > 0$. Синтезируем четырехкомпонентную систему из исходной трехкомпонентной насадки следующим образом. Определив величины φ_1 и φ_2, исходя из заданной кратности M по формулам, приведенным в [2], ограничим перемещение второго компонента до его положения, соответствующего $\beta_2 = -1$. Тогда интервал изменения увеличений β_2 второго компонента равен $\sqrt{M}$ и такую же кратность изменения увеличений β_3 должен иметь и третий компонент. Зададим для него $\beta_{3max} = -1$ и при этом $d_2 = 0$, тогда $s'_2 = s_3$ и $f'_3 = -f'_2$, а $\varphi_3 = \frac{(M-1)}{\sqrt{M}}$.

Во втором крайнем положении должно быть $\beta_3 = -1/\sqrt{M}$. Из выражения для T (2) и $T = T_2 + T_3$ следует, что для обоих крайних положений $T = 0$. Условием компенсации сдвига плоскости изображения (СПИ) в данной системе ($T = 0$) является равенство увеличений $\beta_2 = \beta_3$ в любом из промежуточных положений компонентов. Поскольку после третьего компонента плоскость изображения неподвижна при $\varphi_3 > 0$ и $\beta_3 < 0$, в первом крайнем положении при $\beta_3 = -1/\sqrt{M}$ компонент 3 смещается вправо относительно своего положения при $\beta_3 = -1$ на величину

$$t = (x'_3)_{II} - (x'_3)_I = \frac{1}{\sqrt{M} + 1}. \tag{13}$$

Для d_1 во втором крайнем положении имеем

$$d_1^{II} = x_2^I - x_2^{II} = \frac{\sqrt{M}}{\sqrt{M} + 1}. \tag{14}$$

Из рис. 2 следует $d_2^I = d_1^I + t$, с учетом выражений d_2^I и t из (13), (14) получим $d_2^I = 1$.

Если теперь в первом крайнем положении приставить к третьему компоненту четвертый компонент, взяв $d_3^I = 0$, то для обеспечения афокальности системы необходимо $f_4 = (s'_3)^I$. При $\beta_3 = -1/\sqrt{M}$ получим

$$\varphi_4 = -\sqrt{M - 1}. \tag{15}$$

Таким образом, синтезированная четырехкомпонентная насадка имеет, так же как исходная трехкомпонентная система, длину, равную единице.

Нетрудно показать, что в полученной системе выполняется и условие симметричности увеличений. Действительно из [2] и (15) имеем

$$\Gamma^{\mathrm{II}} = -\frac{f_1'}{f_4'} = \sqrt{M}.$$

Точка встречи подвижных компонентов, как следует из рис. 2, определяется d_1^{II} и зависит от кратности системы (табл. 1).

В рассмотренной системе перемещение третьего компонента обеспечивает не только компенсацию СПИ, но и получение заданной в системе

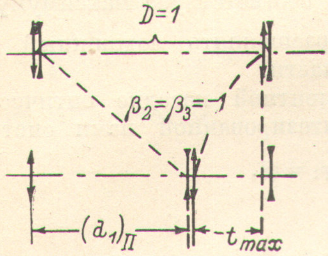

Рис. 2. Система с монотонным профилем кулачка.

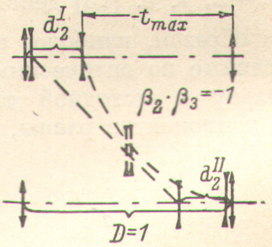

Рис. 3. Система с монотонным профилем кулачка.

требуемой кратности изменения увеличений, так как увеличение компенсирующего компонента изменяется в $\sqrt{M}$ раз.

В ранее рассмотренных системах с U-образным профилем кулачка движение второго компонента обеспечивало получение в системе заданной кратности, а перемещение третьего компонента обеспечивало получение постоянного положения плоскости изображения.

2. $\varphi_3 < 0$. Для данного случая образуем четырехкомпонентную насадку расщеплением второго подвижного компонента исходной трехкомпонентной системы.

Из выражения для T [2] следует, что если при движении второго компонента его фокусное расстояние (оптическая сила) могло бы изменяться, то появилась бы возможность сохранить $T=\mathrm{const}$, а значит и афокальность системы при промежуточных увеличениях β_2.

Таблица 1

M	2	4	10	16	20	25
d_1^{II}	0.58	0.67	0.76	0.80	0.82	0.83

Если задаться $T=4f_2'$, что соответствует $\beta_2=-1$, то при промежуточных увеличениях f', оставаясь отрицательным, должно уменьшаться по абсолютной величине. Если перемещающийся компонент разделить на две части с расстоянием между ними $d=0$ при $\beta_2=-1$ и увеличивать это расстояние ($d>0$) при возрастании и уменьшении β_2 соответственно до $-\sqrt{M}$ и $1/\sqrt{M}$, оптическая сила такого компонента по абсолютной величине будет увеличиваться и в системе можно добиться $T=0$ для всех увеличений.

С целью получения меньшей длины системы необходимо, чтобы требуемое изменение оптической силы подвижного компонента происходило при возможно минимальном расстоянии d между расщепленными частями подвижного компонента.

Из известной формулы

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1\varphi_2 d = \varphi_0 - \varphi_1\varphi_2 d$$

следует, что максимуму изменения $\Delta\varphi$ при фиксированном значении d соответствует максимум величины $\varphi_1\varphi_2$. Определим, при каком соотношении между оптическими силами обеих частей расщепленного компонента произведение $\varphi_1\varphi_2$ достигает максимума.

Обозначив φ_0 оптическую силу подвижного компонента до расщепления, найдем производную $\frac{d(\varphi_1\varphi_2)}{d\varphi_1}$

$$\frac{d(\varphi_1\varphi_2)}{d\varphi_1}=\frac{d[\varphi_1(\varphi_0-\varphi_1)]}{d\varphi_1}=\varphi_0-2\varphi_1.$$

Приравняв $\frac{d(\varphi_1\varphi_2)}{d\varphi_1}=0$, получим

$$\varphi_0=2\varphi_1. \tag{16}$$

$\frac{d^2(\varphi_1\varphi_2)}{d^2\varphi_1}=-2$, т. е. (16) действительно соответствует максимуму $\varphi_1\varphi_2$.

Таким образом, наиболее выгодно расщеплять подвижный компонент на две равные по оптическим силам части.

Поскольку в исходной трехкомпонентной насадке оптические силы внешних компонентов равны, то в синтезированной нами системе имеем

$$\varphi_1=\varphi_4 \text{ и } \varphi_2=\varphi_3. \tag{17}$$

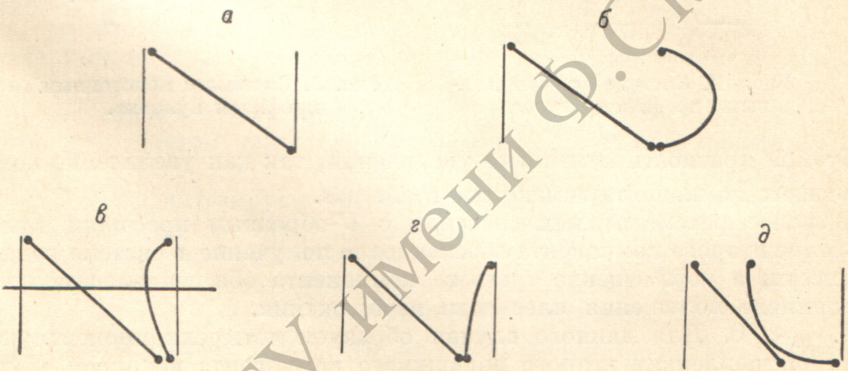

Рис. 4. Кинематические схемы афокальных насадок.

а — тип 1, *б* — тип 2, *в* — тип 3 и 4, *г* — тип 5, *д* — тип 6.

Сохраняется в ней и условие симметричности увеличений: угловое увеличение меняется от $1/\sqrt{M}$ до $\sqrt{M}$. Действительно $\Gamma=-\frac{f_1'}{f_4'}\beta_2\beta_3=-\beta_2\beta_3$, а произведение $\beta_2\beta_3$, как мы приняли выше, имеет закон изменения, эквивалентный изменению увеличения подвижного компонента в симметричной трехкомпонентной насадке.

Поскольку в образованной нами четырехкомпонентной системе $f_2'=2f_{\text{II}}'$, где f_{II}' — величина фокусного расстояния подвижного компонента исходной трехкомпонентной системы, то

$$T=4f_{\text{II}}'=2f_2' \tag{18}$$

и, приняв длину четырехкомпонентной системы за 1, из (17) и $T=1-f_1'-f_4'$ имеем условие афокальности при $\Gamma=1$

$$2f_2'=1-2f_1'. \tag{19}$$

Приняв $d_1^{\text{I}}=0$ и $d_3^{\text{II}}=0$ (рис. 3), учитывая также, что в крайних положениях расщепленный компонент $(\varphi_2+\varphi_3)$ работает с симметричными увеличениями, для компенсации СПИ требуется одинаковая «раздвижка» расщепленного компонента, т. е. $d_2^{\text{I}}=d_2^{\text{II}}$.

Условия афокальности системы при первом из крайних увеличений и заданной кратности могут быть представлены в виде

$$\frac{1}{\sqrt{M}}=-\frac{\varphi_1}{\varphi_1+2\varphi_2+(\varphi_1+\varphi_2)\varphi_2 d_2^{\text{I}}}, \tag{20}$$

$$\frac{1}{\sqrt{M}} = \frac{1 - \left(1 - d_2^{\mathrm{I}}\right)\varphi_1}{1 - d_2^{\mathrm{I}}(\varphi_1 + \varphi_2)}. \tag{21}$$

Совместное решение (19)—(21) приводит к квадратному уравнению

$$\varphi_2^2 + \frac{4\sqrt{M}}{1 - \sqrt{M}}\varphi_2 - 4\sqrt{M} = 0, \tag{22}$$

из которого определяются

$$\varphi_2 = \varphi_3 = \frac{2\sqrt{M}}{\sqrt{M} - 1} A, \tag{23}$$

где $A = 1 - \sqrt{\sqrt{M} + \frac{1}{\sqrt{M}} - 1}$.

Далее из (19) находим

$$\varphi_1 = \varphi_4 = \frac{2\varphi_2}{\varphi_2 - 2} \tag{24}$$

и из (21)

$$d_2^{\mathrm{I}} = d_2^{\mathrm{II}} = \frac{\sqrt{M} - 1}{2\sqrt{M}}. \tag{25}$$

В рассмотренной системе, как и в предыдущей, движение обоих компонентов обеспечивает одновременно как получение заданной кратности изменения увеличения объектива, так и компенсацию СПИ. Более того,

Таблица 2

Параметры различных схем афокальных насадок

№ п/п	Силы компонентов φ_i ($M = 16$), длина системы	Знак компенсирующего компонента	Тип кулачка, его относительная длина ($M = 16$)	Область применения	Типы и названия объективов
1	2	3	4	5	6
1	$\varphi_1 = 0.75$ $\varphi_2 = -3.75$ $\varphi_3 = 0.75$ $D = 1$	—	Отсутствует	Объективы с дискретным изменением любой кратности	«Гранит ТМ-1»
2	$\varphi_1 = 0.75$ $\varphi_2 = -3.75$ $\varphi_3 = 0.75$ $D = 1.6$	+	U-образный (внешний), $t = 0.6$	Киносъемочные короткофокусные системы малой кратности $M = 2 \div 3$	«Агат»
3	$\varphi_1 = 0.75$ $\varphi_2 = -3.75$ $\varphi_3 = -2.25$ $\varphi_4 = 3$ $D = 1.0$	—	U-образный (внутренний), $t = +0.17$	Системы большой и средней кратности: киносъемочные, телевизионные	«Варотал», «Шнейдер», «Канон», «Гранит», «Вариогамма»
4	$\varphi_1 = 0.75$ $\varphi_2 = -3.75$ $\varphi_3 = 3.33$ $\varphi_4 = -2.67$ $D = 1.05$	+	U-образный (внутренний), $t = 0.11$	Фотографические системы малой кратности	«Тамрон», «Гексанон», «Вивитар» и др.
5	$\varphi_1 = 0.75$ $\varphi_2 = -3.75$ $\varphi_3 = 3.75$ $\varphi_4 = -3.0$ $D = 1.0$	+	Монотонный (внутренний), $t = 0.2$	Телевизионные и киносъемочные системы большой и средней кратности	«Анженье», «Вариогоир»
6	$\varphi_1 = 1.03$ $\varphi_2 = -2.14$ $\varphi_3 = -2.14$ $\varphi_4 = 1.03$ $D = 1$	—	Монотонный (внутренний), $t = 0.625$	Телевизионные системы средней кратности, не широкоугольные	«Варотал»

так как величины перемещений обоих подвижных компонентов одинаковы ($d_3^{\mathrm{I}}=d_1^{\mathrm{II}}$), то по кулачковой (нелинейной) направляющей может двигаться любой из них.

В табл. 2 и на рис. 4 приведены характеристики и оптические силы компонентов и схемы рассмотренных вариантов насадок.

Исходная трехкомпонентная насадка Грамацкого (тип 1) применяется в настоящее время для разработки объективов с дискретно изменяющимся фокусным расстоянием, так как при промежуточных увеличениях она имеет недопустимо большой СПИ.

Модифицированная насадка Грамацкого (тип 2) с перемещающимся по кулачку одним из внешних компонентов иногда используется для построения короткофокусных систем малой кратности $M=2.5-3^{\times}$, применяющихся в 8-миллиметровых кинокамерах простого класса.

Наибольшее практическое распространение получила система с U-образным профилем кулачка и отрицательным третьим компонентом (тип 3). Оптическая сила его в этой схеме заметно меньше, чем в других системах. На базе этой схемы построено большое число отечественных и зарубежных систем большой кратности. Меньшие силы подвижных компонентов, в частности третьего, позволяют при идентичных оптических характеристиках получать системы наименьшей длины и габаритов.

Система с положительным третьим компонентом (тип 4) и возвратно-поступательным движением имеет заметно большую его оптическую силу и используется для разработки систем малой кратности ($2-3^{\times}$), как правило, фотографических (объективы «Тамрон», «Вивитар», «Гексанон»).

При малых M оптические силы всех компонентов заметно меньше и разница между различными вариантами систем не столь существенна. Схема с монотонным профилем кулачка и положительным третьим компонентом (тип 5) также используется для построения значительного числа систем средней и большой кратности. Хотя компенсирующий компонент в этой системе имеет большую оптическую силу, однако монотонный и плавный профиль кулачка позволяет создать более надежную и простую механическую и кинематическую конструкции объектива.

Схема с отрицательным третьим компонентом и монотонным профилем кулачка (тип 6) получила ограниченное применение в основном для систем средней кратности с небольшим угловым полем зрения. При увеличении углового поля зрения в этой схеме резко растут диаметры ее фронтальных компонентов и, как следствие, вес и габариты объектива. Другим недостатком, ограничивающим ее распространение, является увеличенная, более чем в 2 раза по сравнению с другими системами, протяженность кулачковой направляющей.

Рассмотренные четырехкомпонентные насадки в первую очередь третьего типа сами могут использоваться в качестве элементов для построения более сложных двухкаскадных систем с особо большой кратностью ($M=30-50$) изменения фокусных расстояний. Изложенная выше методика синтеза систем, исходным элементом которой является одиночный перемещающийся отрицательный компонент, показывает, что при осуществлении, например, 30-кратной системы из двух последовательно установленных насадок кратностью $10^{\times}$ и $3^{\times}$, в которых используются компоненты одного и того же фокусного расстояния f', общая длина системы определяется величинами перемещений подвижных компонентов в обеих насадках.

Из выражения для Δ [2] при $M=10$ и $M=3$ имеем

$$\Delta_1=2.84f', \quad \Delta_2=1.16f' \quad \text{и} \quad L=\Delta_1+\Delta_2=4f'.$$

Если же 30-кратный объектив осуществлять на основе одной четырехкомпонентной насадки, длина которой равна величине перемещения одного отрицательного компонента того же фокусного расстояния, то при $M=30$ имеем

$$L=\Delta=5.3f',$$

т. е. в двухкаскадной системе при той же кратности можно получить на 25% меньшую длину объектива, что весьма важно.

В заключение хочется подчеркнуть, что предложенная выше методика синтеза из простейших элементов более сложных панкратических систем позволяет логично и весьма просто определять параксиальные элементы различных типов двух-, трех- и четырехкомпонентных объективов, которые получили наибольшее распространение на практике. Особенно следует отметить простоту предложенного метода, основанного на изучении и использовании свойств простейшего элемента — одиночного подвижного компонента. Задача сводится, как правило, к решению некоторых линейных уравнений, либо в отдельных случаях (тип 6) к решению квадратного уравнения, что также не представляет трудностей.

Литература

[1] М. С. Стефанский, Н. А. Градобоева, И. Е. Исаева, Т. В. Рубахина. Оптико-механич. промышл., № 8, 24, 1970.
[2] М. Г. Шпякин. Автореф. канд. дис., Л., 1971.

Поступило в Редакцию 3 января 1980 г.