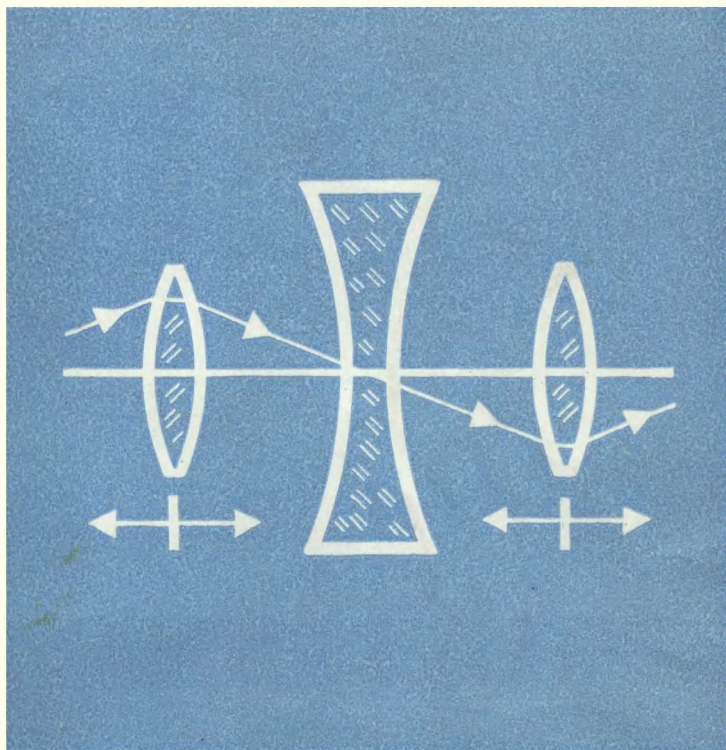




БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ



И. И. ПАХОМОВ

# ПАНКРАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

И. И. ПАХОМОВ



БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ



# ПАНКРАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

МОСКВА

«МАШИНОСТРОЕНИЕ»

1976



Scan AAW

Рецензент д-р техн. наук **Л. А. НОВИЦКИЙ**

**Пахомов И. И.** Панкратические системы. М., «Машиностроение», 1976, 160 с.

В книге изложены теоретические основы расчета оптических панкратических систем различного назначения (зрительные трубы, лазерные оптические системы, панкратические системы имитаторов, тренажеров и т. д.); приведены формулы для расчета гауссовых элементов одно-, двух-, трех- и  $n$ -компонентных панкратических систем; рассмотрен вопрос применения ЭЦВМ при расчете панкратических систем.

Изложены методы расчета влияния отклонений параметров панкратических систем на расфокусировку и дан расчет допусков. Рассмотрены вопросы проектирования панкратических систем различного назначения. Приведены многочисленные примеры расчета параметров систем и параметры рассчитанных на ЭЦВМ систем.

Книга предназначена для инженерно-технических работников КБ, НИИ и заводов, занимающихся вопросами проектирования и расчета сложных оптических систем. Табл. 24, ил. 58, список лит. 58 назв.

В настоящее время панкратические системы получили широкое распространение. За последние 15—20 лет область применения панкратических систем значительно расширилась и охватывает теперь не только фотографию, кинематографию, телевидение, микроскопию, спектрофотометрию, но и такие отрасли техники, как тренажеростроение, тепловидение, пирометрия, лазерная техника и др.

Большой практический интерес представляет создание панкратических систем с высокими оптическими характеристиками: большим перепадом увеличений, малыми размерами, высоким относительным отверстием, большим углом поля зрения, хорошим качеством изображения на всем интервале изменения увеличений. Однако широкому внедрению панкратических систем препятствуют трудности, связанные с чрезвычайно большой трудоемкостью и сложностью расчетов, несмотря на использование новейшей электронно-вычислительной техники, а также конструктивные и технологические недостатки разрабатываемых систем: значительные размеры, большое число линз, нелинейные законы перемещения компонентов, сравнительно невысокие перепады увеличений.

Необходимо отметить при этом, что основное направление развития панкратических систем идет по линии создания систем с механической компенсацией смещения плоскости изображения, когда в результате перемещения отдельных компонентов по различным нелинейным законам достигается требуемый диапазон изменения увеличений и постоянство плоскости изображения [3, 14, 37]. Более рациональным и перспективным является создание панкратических систем с линейной связью между перемещениями компонентов (оптическая компенсация), что обеспечивает большую простоту и меньшую массу конструкции по сравнению с системами с механической компенсацией.

Настоящая книга посвящена изложению теории расчета гауссовых элементов панкратических систем общего вида, т. е. систем, состоящих из произвольного числа компонентов, которые вместе с плоскостью предметов перемещаются по линейному закону, в результате чего изменяется увеличение оптической системы. Следует особо отметить, что метод расчета един для оптических систем всех возможных типов (линзовых, зеркальных и зеркально-линзовых), что очень удобно при практических расчетах.

Положительным качеством излагаемого метода расчета является также и то, что он применим для систем, в которых возможно перемещение всех ее компонентов, причем передаточные отношения между перемещениями компонентов постоянны. Поэтому рассматриваемые в настоящей книге системы включают в себя как частный случай те системы, которые рассматривались Беком, Бергстейном, Стефанским, Шпякиным и др. [15, 42, 45, 49, 50, 51—54]. Предлагаемая автором методика расчета проста (по сравнению с известной методикой расчета Бергстейна) и удобна для использования при расчетах на ЭЦВМ.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАУССОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПАНКРАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Настоящая глава посвящена расчету гауссовых параметров систем переменного увеличения (СПУ) с линейной связью между перемещениями компонентов. Рассчитать СПУ это значит, исходя из ее назначения, обеспечить нужный перепад  $M$  увеличений системы при заданном максимально допустимом смещении  $\Delta_{\max} = \max|\Delta|$  плоскости изображения (ПИ), обусловленном постоянством передаточных отношений между перемещениями компонентов [18]. Эти необходимые при расчете требования не всегда бывают достаточными. При расчете часто ставят еще дополнительные условия (заданная длина системы, изменение увеличения в заданном диапазоне  $\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2$ , минимальное значение оптических сил компонентов и др.), которым должна удовлетворять рассчитываемая панкратическая система.

Очевидно, что с математической точки зрения решение задачи возможно многими способами, так как в выражении, характеризующем смещение  $\Delta$  ПИ, много свободных параметров. Например, в  $n$ -компонентной СПУ число свободных параметров [коэффициентов в выражении (75) для  $\Delta$ ], на которые налагаются два обязательных условия ( $M$ ,  $\Delta_{\max}$ ) и возможно несколько дополнительных условий, равно  $2n+1$ . Поэтому наиболее простой путь, который приводит к решению поставленной задачи, заключается в следующем: 1) задаем значения коэффициентов  $c_k^{(n)}$  числителя  $f(m)$  выражения (75)  $\Delta$ ; 2) находим экстремум  $f(m)$ ; 3) зная  $\max|f(m)|$ , задаем значение  $\delta$  знаменателя в выражении  $\Delta$  на границе изменения  $m = m_2$  исходя из условия  $\delta(m_2) \approx \pm \frac{\max|f(m)|}{\max|\Delta|}$ ; 4) записываем второе уравнение, которое обеспечит получение заданного перепада увеличений  $M$  и заведомо обеспечение  $\max(\Delta)$ , заданного по ТУ.

Таким образом, получим два уравнения [18]:

$$(1 - M) \delta = 2 \sum_{k=1}^n d_k^{(n)} \quad (k - \text{нечетные});$$

$$(1 + M) \delta = 2 \sum_{k=0}^n d_k^{(n)} \quad (k - \text{четные}),$$

которые обеспечивают заданные значения  $\dot{M}$  и  $\Delta_{\max}$ . При таком методе расчета число свободных параметров с  $2n-2$  уменьшается до  $n-1$  (коэффициенты числителя заданы). Следовательно, для двухкомпонентной СПУ остается один свободный параметр, для трехкомпонентной — два и т. д. Задавая значения свободных параметров (из условия обеспечения дополнительных требований или произвольно), проводим расчет параметров СПУ, анализируем их и выбираем нужную систему.

Значения коэффициентов  $c_k^{(n)}$  в числителе  $\Delta$  можно задавать также различными способами:

1) выбрать эти коэффициенты, обеспечивая неподвижность ПИ в заданных положениях;

2) в качестве полинома  $f(m)$  выбирать такой, который обеспечивает наименьшее значение  $\max |f(m)|$  в пределах перемещения компонентов; такими полиномами являются полиномы Чебышева, наименее уклоняющиеся от нуля [43] при  $-h \leq m \leq h$  или  $0 \leq m \leq 1$  с нулевой точкой и др. (табл. 14);

3) можно использовать при расчете дроби Чебышева, наименее уклоняющиеся от нуля [22].

Изложенная схема расчета и была использована при рассмотрении одно-, двух-, трех- и  $n$ -компонентных СПУ.

## 1. О КЛАССИФИКАЦИИ СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ

Современный уровень развития панкратических систем, получивших широкое распространение в фотографии, кинематографии, телевидении, пирометрии, микроскопии, радиометрии, спектрофотометрии, тренажеростроении, различных приборах ИК техники, характеризуется многообразием конструкций, отличающихся принципами устройства, законами перемещения компонентов, способами получения изменяющихся характеристик, числом подвижных и неподвижных компонентов, их расположением, знаками оптических сил компонентов, их числом и формой и т. д.

Ориентироваться в таком множестве панкратических систем затруднительно без строгой классификации существующих конструкций. Имеется ряд работ, в которых рассматриваются вопросы классификации оптических панкратических систем [4, 57, 50]. Однако выдвигаемые авторами предложения о классификации панкратических систем, как правило, не охватывают всего их многообразия (они в основном относятся к объективам с переменным фокусным расстоянием) и не могут считаться полными.

Известна классификация Кингслийка [57], по которой все панкратические системы разделяют на вариообъективы и трансфокаторы (вариообъектив — объектив, фокусное расстояние которого непрерывно изменяется за счет перемещения его компонентов вдоль оптической оси; трансфокатор — оптическая система, состоящая из двух частей: афокальной панкратической насадки и объектива с постоянным фокусным расстоянием). Такая краткая классификация по сути дела применима только к панкратическим объективам (классификация опубликована в 1946 г., т. е. в то время, когда наиболее широкое применение панкратические системы нашли при создании кинофотообъективов).

Бэк [50] предложил классифицировать панкратические системы по способу компенсации смещения плоскости изображения. Он

разделил их на системы с оптической и механической компенсацией смещения плоскости изображения (панкратические системы с механической компенсацией смещения плоскости изображения — оптические системы, в которых непрерывное изменение их фокусного расстояния и неподвижность плоскости изображения осуществляются за счет нелинейного перемещения компонентов оптической системы; панкратические системы с оптической компенсацией — системы, в которых непрерывное изменение их фокусного расстояния осуществляется за счет перемещения компонентов с линейной связью между их перемещениями, в таких системах плоскость изображения перемещается в небольших пределах). Однако и такая классификация очень проста и не позволяет провести полную систематизацию панкратических систем.

С целью систематизации отдельных конструкций панкратических объективов проф. Б. Н. Бегуновым предложена классификация [4], в соответствии с которой все панкратические объективы разделяются на два класса: класс варнообъективов и класс трансфокаторов, каждый из которых в свою очередь делится на два подкласса: системы с механической компенсацией и системы с оптической компенсацией, а каждый подкласс в свою очередь разделяется на системы из групп компонентов определенного рода, вида, типа и конструкции. Эта классификация, обобщившая предложения Кингслийка и Бэка, является более полной, но и она относится только к классификации панкратических объективов.

Все рассмотренные классификации относятся к панкратическим объективам, неотъемлемой и основной частью которых является панкратическая система (панкратическая система — часть оптической системы, за счет которой осуществляется непрерывное изменение увеличения и которая может иметь самостоятельное назначение). Поэтому в первую очередь необходима классификация СПУ, а затем на ее основе можно классифицировать и оптические системы, составной частью которых является панкратическая система, по их типу, назначению и т. д. (объективы, телескопические системы и др.).

При классификации СПУ будем исходить из закона изменения увеличения системы (дискретное или непрерывное изменение увеличения), закона перемещения компонентов оптической системы, с помощью которых осуществляется изменение увеличения (линейный закон, нелинейный и др.), числа компонентов системы, их типов (линзовый, зеркальный) и т. д. Предлагаемая классификация представлена на рис. 1.

В соответствии с предлагаемой классификацией все оптические системы переменного увеличения (СПУ) независимо от способа изменения, увеличения делятся на два класса: 1) СПУ с непрерывным изменением увеличения (панкратические системы) и 2) СПУ с дискретным изменением увеличения. Следует заметить, что в настоящее время в литературе [3] используется терминология, в которой более общее понятие «система переменного увеличения» применяется только к системам с дискретным изменением увеличения (в отличие от панкратических систем), и поэтому нет обобщающего определения любой оптической системы, в которой происходит изменение увеличения. Каждый класс СПУ в свою очередь подразделяется по способу изменения увеличения.

Панкратические системы делятся на системы, в которых изменение увеличения осуществляется с помощью: 1) непрерывного из-



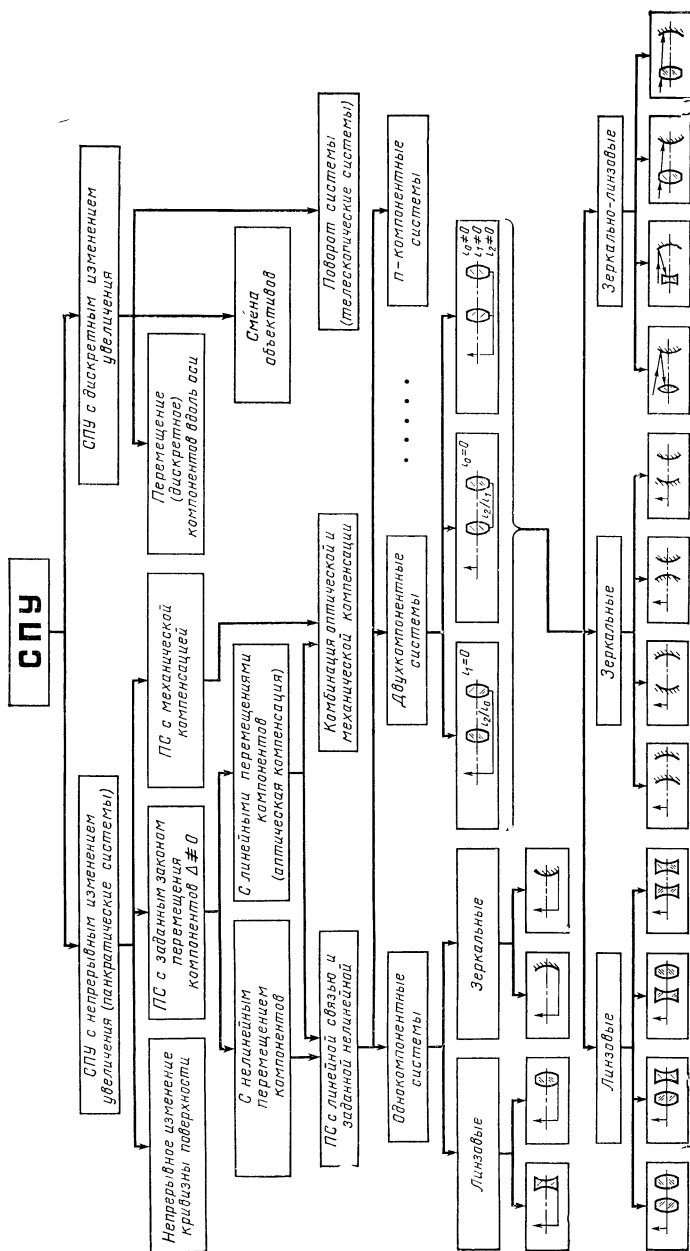


Рис. 1. Классификация систем переменного увеличения

менения кривизны оптической (или оптических) поверхности; 2) перемещения компонентов по заданному закону при  $\Delta \neq 0$  (в случае линейного перемещения компонентов системы называются системами с оптической компенсацией); 3) перемещения компонентов по нелинейному закону при неподвижной плоскости изображения (механическая компенсация смещения плоскости изображения).

Комбинации этих способов изменения увеличения дают в свою очередь возможность построить панкратические системы, в которых может одновременно, например, осуществляться оптическая и механическая компенсация смещения плоскости изображения (на различных интервалах изменения увеличения) и т. д.

Дальнейшее разделение систем осуществляют по числу компонентов панкратической системы (однокомпонентные, двухкомпонентные, трехкомпонентные, ...,  $n$ -компонентные). Многокомпонентная панкратическая система ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) может быть в свою очередь классифицирована по кинематике перемещения компонентов. На рис. 1 приведена возможная классификация двухкомпонентных панкратических систем в зависимости от схемы перемещения компонентов для изменения увеличения системы.

В свою очередь каждая из этих панкратических систем может быть линзовой, зеркальной или зеркально-линзовой (исключая однокомпонентные системы). Из табл. 1 видно, что двухкомпонентные (ДПС) линзовые и зеркальные панкратические системы, содержащие отрицательные и положительные компоненты, могут быть четырех видов. Зеркально-линзовые системы разделяют на восемь видов в зависимости от того, каким является первый компонент — линзовым или зеркальным и от того, какие эти компоненты — положительные или отрицательные. Однако необходимо отметить, что далеко не каждая схема находит применение и широкое распространение, а иногда и вообще не может быть использована для построения систем. Например, некоторые схемы требуют дополнительной установки пластин или зеркал, отводящих изображение, что усложняет конструкцию или ухудшает светоптические условия работы системы.

Рассмотрим трехкомпонентные панкратические системы (ТПС). Из табл. 1 видно, что трехкомпонентные линзовые и зеркальные панкратические системы могут быть восьми видов, каждую из которых можно получить из двухкомпонентной системы путем добавления положительного или отрицательного компонента. Зеркально-линзовые системы могут быть 48 видов: I—III — двухлинзовые и IV—VI — двухзеркальные. При построении зеркально-линзовых панкратических систем могут найти широкое применение схемы III, IV, V видов, по типу которых построен ряд зеркально-линзовых объективов (хотя не панкратических) — система Чуриловского [7], объективы МТО.

Предложенная классификация, естественно, не совершенная, но она более полно охватывает все панкратические системы, которые могут быть осуществлены в настоящее время.

## 2. ОДНОКОМПОНЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ

Рассмотрим методику расчета гауссовых параметров однокомпонентных панкратических систем. Эти системы являются простейшими и имеют весьма ограниченное применение. СПУ такого типа

Таблица 1

Тип ТПС	Схема		Тип ТПС	Схема	
	исходной ДПС	ТПС		исходной ДПС	ТПС
Линзовые			Зеркальные		
Зеркально-линзовые	I		IV		
	II		V		
	III		VI		

могут быть использованы в тех случаях, когда требуется малый перепад увеличений или могут быть допущены большие смещения плоскости изображения (например, осветительные системы и др.). Однако подобное рассмотрение однокомпонентных систем позволяет наиболее просто изложить универсальный метод, который в дальнейшем используется для расчета многокомпонентных СПУ различных типов (линзовых, зеркальных и зеркально-линзовых).

## Однокомпонентные СПУ с линейной связью между перемещениями объектива и предметной плоскости

Рассмотрим оптическую схему однокомпонентной СПУ (рис. 2), в которой увеличение меняется за счет перемещения предметной плоскости (ПП) на величину  $i_0 m$  и объектива на величину  $i_1 m$ , где  $m$  — переменный параметр, характеризующий величину перемеще-

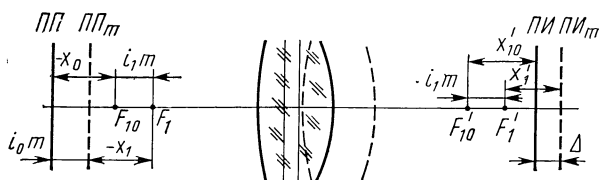


Рис. 2. Схема однокомпонентной панкратической системы

ния, а  $i_0$  и  $i_1$  — постоянные коэффициенты, отношение которых  $i_1/i_0$  есть передаточное отношение между перемещениями предметной плоскости и объектива.

Как известно [51], в СПУ с линейной зависимостью между перемещениями компонентов происходит смещение плоскости изображения (ПИ). Выразим зависимость смещения плоскости изображения  $\Delta$  от параметров СПУ (фокусного расстояния объектива  $f_1$ , величин  $x_0$ ,  $x'_{10}$  и коэффициентов  $i_0$ ,  $i_1$ ).

Из рис. 2 находим  $x_1 = x_0 + (i_0 - i_1)m$ ;  $\Delta = x'_1 - x'_{10} + i_1 m$ . Используя уравнение Ньютона [2], получаем  $x'_1$  и  $x'_{10}$ :

$$x'_1 = -\frac{f_1^2}{x_1} = -\frac{f_1^2}{x_0 + (i_0 - i_1)m}; \quad x'_{10} = -\frac{f_1^2}{x_0},$$

Подставляя  $x'_1$  и  $x'_{10}$  в выражение для  $\Delta$ , получаем

$$\Delta = \frac{i_1(i_0 - i_1)m^2 + [i_1 x_0 - x'_{10}(i_0 - i_1)]m}{(i_0 - i_1)m + x_0}. \quad (1)$$

Так как  $i_1 \neq 0$  и  $i_0 - i_1 \neq 0$ , то (1) можно переписать в таком виде:

$$\Delta = \frac{m^2 + c_1^{(1)} m}{\frac{m}{i_1} + d_0^{(1)}}, \quad (2)$$

где

$$c_1^{(1)} = \frac{i_1 x_0 - x'_{10} (i_0 - i_1)}{i_1 (i_0 - i_1)}; \quad d_0^{(1)} = \frac{x_0}{i_1 (i_0 - i_1)}.$$

Выразим параметры оптической системы СПУ через коэффициенты

$$c_1^{(1)} \text{ и } d_0^{(1)}, \quad i_0 \text{ и } i_1;$$

$$x_0 = i_1 (i_0 - i_1) d_0^{(1)}; \quad x'_{10} = -i_1 (c_1^{(1)} - i_1 d_0^{(1)}); \\ f_1^2 = -x_0 x'_{10}. \quad (3)$$

Увеличение СПУ

$$\beta = -\frac{f_1}{x_1} = -\frac{f_1}{(i_0 - i_1) m + x_0} = -\frac{f_1}{i_1 (i_0 - i_1) \left[ \frac{m}{i_1} + d_0^{(1)} \right]}.$$

Будем считать, что переменный параметр  $m$  изменяется в интервале  $m_1 \leq m \leq m_2$ . Тогда условие перепада увеличений  $M =$

$\frac{\beta(m_2)}{\beta(m_1)}$  можно записать в таком виде:

$$M = \frac{\frac{m_1}{i_1} + d_0^{(1)}}{\frac{m_2}{i_1} + d_0^{(1)}}. \quad (4)$$

Из (4) можно выразить коэффициент  $d_0^{(1)}$  через  $M$ ,  $m_1$  и  $m_2$ :

$$d_0^{(1)} = \frac{m_1 - M m_2}{i_1 (M - 1)}. \quad (5)$$

Используем для расчета СПУ дроби Чебышева, наименее уклоняющиеся от нуля, которые в общем случае можно записать так [43]:

$$\frac{U}{V} = \frac{m^k + a_1 m^{k-1} + a_2 m^{k-2} + \dots + a_{k-1} m + a_k}{b_0 m^{k-l-1} + b_1 m^{k-l-2} + \dots + b_{k-l-1}},$$

где

$$U = \left( \frac{m + \sqrt{m^2 - h^2}}{2} \right)^{l+1} \times$$

$$\begin{aligned} & \times \left[ \frac{\frac{\alpha_1 m - h^2}{\alpha_1} + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} \sqrt{m^2 - h^2}}{1 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}}} \right]^{l_1} \times \dots + \\ & \quad + \left( \frac{m - \sqrt{m^2 - h^2}}{2} \right)^{l+1} \times \\ & \times \left[ \frac{\frac{\alpha_1 m - h^2}{\alpha_1} - \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} \sqrt{m^2 - h^2}}{1 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}}} \right]^{l_1} \times \dots, \quad (6) \end{aligned}$$

$l_1, l_2, \dots$  — кратность корней знаменателя дроби  $V$ ;  
 $\alpha_1, \alpha_2, \dots$  — корни знаменателя;  $-h \leq m \leq h$ .

Предел отклонения дроби от нуля

$$\begin{aligned} & L = \pm \\ & \pm \frac{h^k}{2^{l_k} b_{k-l-1} \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} \right]^{l_1} \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_2^2}} \right]^{l_2} \times \dots}. \quad (7) \end{aligned}$$

Для рассматриваемого нами случая  $k=2$ ;  $l=0$ . Тогда выражения (6) и (7) запишутся так:

$$\left. \begin{aligned} U &= m^2 - \frac{\frac{h^3}{\alpha_1}}{1 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}}} m - \frac{\sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} h^2}{1 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}}}; \\ L &= \pm \frac{h^2}{d_0^{(1)} \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} \right]}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Из (2) находим  $\alpha_1 = -i_1 d_0^{(1)}$ . Перепишем условие (5) перепада увеличений:

$$d_0^{(1)} = -\frac{h}{i_1} \frac{M+1}{M-1}. \quad (9)$$

Следовательно,  $\alpha_1 = -i_1 d_0^{(1)} = h \frac{M+1}{M-1}$ , и тогда выражение (8) можно представить в таком виде:

$$U = m^2 + a_1 m + a_2,$$

где

$$a_1 = -h \frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}+1}; \quad a_2 = -\frac{2\sqrt{M}h^2}{(\sqrt{M}+1)^2}.$$

Согласно (8) предел отклонения величины смещения плоскости изображения  $\Delta$  от нуля

$$L = \pm \frac{(1+M)h^2}{d_0^{(1)}(1+\sqrt{M})^2}. \quad (10)$$

Если требуется рассчитать параметры СПУ для заданных значений величин перепада увеличений  $M$ , максимального смещения плоскости изображения  $\max|\Delta|=L$  и  $m_2=-m_1=h$ , то по формулам (9) и (10), следует найти коэффициент  $d_0^{(1)}$  и передаточное отношение  $i_1$ :

$$d_0^{(1)} = \frac{(1+M)h^2}{(1+\sqrt{M})^2 L}; \quad i_1 = -\frac{\sqrt{M}+1}{\sqrt{M}-1} \frac{L^*}{h}. \quad (11)^*$$

Так как числитель  $U$  дроби Чебышева имеет вид (8), а в числителе выражения (2) отсутствует свободный член, то, чтобы привести числитель к виду (8), запишем выражение для смещения плоскости изображения относительно некоторого промежуточного положения плоскости изображения (рис. 2):

$$\Delta' = \Delta + \Delta_0 = \frac{m^2 + \left(c_1^{(1)} + \frac{\Delta_0}{i_1}\right)m + d_0^{(1)}\Delta_0}{\frac{m}{i_1} + d_0^{(1)}}. \quad (12)$$

Из (12) имеем  $d_0^{(1)}\Delta_0 = -\frac{\sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} h^2}{1 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}}}$ , и, следовательно,

$$\Delta_0 = -\frac{2\sqrt{M} \cdot L}{1+M}. \quad (13)$$

Коэффициент

$$c_1^{(1)} = -h \frac{M-1}{M+1}. \quad (14)$$

---

\* В формуле (11) и далее под  $L$  будем понимать алгебраическую величину.

Выражения (11), (13) и (14) позволяют по заданным значениям  $M$ ,  $L$  и  $h$  вычислить  $c_1^{(1)}$ ,  $d_0^{(1)}$ ,  $i_1$ ,  $\Delta_0$ , а следовательно, и параметры оптической системы СПУ по формулам (3):

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= -\frac{\sqrt{M}+1}{\sqrt{M}-1} \frac{L}{h}; & d_0^{(1)} &= \frac{h^2(1+M)}{(1+\sqrt{M})^2 L}; & \Delta_0 &= -\frac{2L\sqrt{M}}{1+M}; \\ c_1^{(1)} &= -\frac{h(M-1)}{M+1}; & x'_{10} &= \frac{4ML}{(M+1)(\sqrt{M}-1)^2}; \\ x_0 &= i_1(i_0 - i_1) d_0^{(1)}; & f_1^2 &= -x_0 x'_{10}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

В выражениях (15) при заданных значениях  $M$  и  $L$  в качестве свободных параметров остаются величины  $h$  и  $i_0$ . Их можно выбрать произвольно, или рассчитать, задавшись еще дополнительными условиями, которым должна удовлетворять рассчитываемая СПУ (например, увеличением и длиной системы или фокусным расстоянием компонента).

Если выбрано фокусное расстояние объектива  $f_1^2$ , то из (15) можно определить передаточное отношение  $i_0$  и  $x_0$ :

$$\left. \begin{aligned} i_0 &= -\frac{\sqrt{M}+1}{h} \left[ \frac{f_1^2(\sqrt{M}-1)^3}{4ML} + \frac{L}{\sqrt{M}-1} \right]; \\ x_0 &= \frac{f_1^2(M+1)(\sqrt{M}-1)^2}{4ML}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Если задать значение увеличения при  $m_2 = h(\beta(m_2)) = \beta(h) = \beta_0$ , то тогда  $i_0$  и  $f_1$  можно вычислить по формулам:

$$i_0 = -\frac{L}{h} \frac{\sqrt{M}+1}{\sqrt{M}-1} \left( \frac{M}{\beta_0^2} + 1 \right); \quad f_1 = -\frac{2ML}{(\sqrt{M}-1)^2 \beta_0}. \quad (17)$$

Формулы (15), (16) и (17) позволяют полностью рассчитать параметры оптической системы переменного увеличения для заданных технических условий.

**Зеркальные однокомпонентные системы переменного увеличения.** Формулы (15) позволяют рассчитывать параметры СПУ не только с линзовым объективом, но и с зеркальным.

Известно [2], что формула Ньютона для зеркальных систем имеет вид  $x_1 x_1' = f_1^2$ . Следовательно, зеркальные СПУ могут быть построены в том случае, когда в расчете по формулам (15) получается  $f_1^2 < 0$ . Находим выражение  $f_1^2$  через  $M$ ,  $L$ ,  $h$  и  $i_0$ :

$$f_1^2 = -\frac{4MLh}{(M-1)(\sqrt{M}-1)^2} \left[ i_0 + \frac{\sqrt{M}+1}{\sqrt{M}-1} \frac{L}{h} \right]. \quad (18)$$



Условие, когда объектив СПУ должен быть зеркальным, получаем из (18):

$$\frac{L}{M-1} \left( i_0 + \frac{\sqrt{M}+1}{\sqrt{M}-1} \frac{L}{h} \right) > 0, \quad (19)$$

т. е.

$$i_0 > -\frac{L(\sqrt{M}+1)}{h(\sqrt{M}-1)} \quad \text{при} \quad \frac{L}{M-1} > 0;$$

$$i_0 < -\frac{L(\sqrt{M}+1)}{h(\sqrt{M}-1)} \quad \text{при} \quad \frac{L}{M-1} < 0.$$

Выбирая передаточное отношение  $i_0$ , удовлетворяющее неравенствам (19), получаем СПУ с зеркальным объективом.

**Пример.** Рассчитаем однокомпонентную СПУ, обеспечивающую перепад увеличений  $M=2,25$ ; максимальное смещение плоскости изображения  $L=0,01$  при  $h=1$ .

По формулам (15) находим  $\sqrt{M}-1=0,5$ ;  $i_1=-0,05$ ;  $d_0^{(1)}=52$ ;  $\Delta_0=-0,00923$ ;  $c_1^{(1)}=-0,384$ ;  $x'_{10}=0,1108$ .

Смещение  $\Delta$  плоскости изображения определяется следующей зависимостью:

$$\Delta = \frac{m^2 - 0,384}{-20m + 52} - 0,00923.$$

При  $m=+1$  смещение ПИ  $\Delta=0,01$ .

Экстремумы  $m$  имеют место в точках  $m_1=5$  и  $m_2=0,2$ ; причем  $\Delta_{\text{экстр}}(0,2)=-0,01$ .

Коэффициенты  $d_0^{(1)}$ ,  $c_1^{(1)}$ ,  $\Delta_0$  и  $i_1$  подсчитаны правильно, так как действительно получилась дробь, наименее уклоняющаяся от нуля.

Задавшись, например, значением  $i_0=0,1$ , находим  $x_0=-0,05(0,1+0,05)52=-0,05 \cdot 52 \cdot 0,15=-2,6 \cdot 0,15=-0,39$ ;

$f_1^2 = -(0,1108)(-0,39) = +0,0432$ , т. е. получилась линзовая система.

Возьмем  $i_0=0,1$ ; тогда  $x_0=-0,05(-0,1+0,05)52=-2,6(-0,05)=-0,13$ ;  $\beta = -\frac{f_1}{x_1} = -\frac{0,12}{0,13} = -\frac{12}{13}$ ;

$f_1^2 = -(0,13)(0,1108) = -0,0144$ , т. е. получилась зеркальная система.

Таким образом, для рассматриваемого случая можно построить различные системы. Все эти системы имеют одни и те же значения максимального смещения плоскости изображения и перепада увеличений. В зависимости от назначения системы следует выбрать один из этих вариантов.

### 3. ДВУХКОМПОНЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ

Рассмотрим двухкомпонентную панкратическую систему, изменение увеличения которой в заданном диапазоне достигается перемещениями предметной плоскости, первого и второго компонентов (рис. 3).

В рассматриваемой оптической системе предметная плоскость перемещается на величину  $i_0 m$ , первый компонент — на величину  $i_1 m$  и второй компонент — на величину  $i_2 m$ ;  $i_1/i_0$  — передаточное отношение между перемещениями ПП и первого компонента;  $i_2/i_0$  — передаточное отношение между перемещениями ПП и второго компонента;  $i_2/i_1$  — передаточное отношение между перемещениями первого и второго компонентов;  $m$  — переменный параметр, характери-

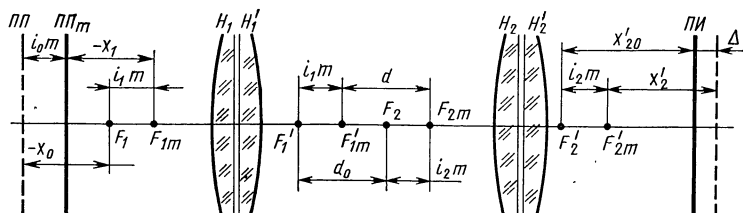


Рис. 3. Схема двухкомпонентной панкратической системы

зующий величины перемещения ПП и компонентов. При произвольных значениях  $i_0$ ,  $i_1$  и  $i_2$  происходит перемещение плоскости изображения (ПИ) на некоторую величину  $\Delta$ .

На рис. 3 введены следующие обозначения:  $x_1$  — расстояние от фокуса  $F_1$  первого компонента до ПП;  $x_0$  — расстояние от фокуса  $F_1$  первого компонента до ПП при  $m=0$  (в нулевом положении);  $d$  — расстояние от фокуса  $F_1'$  первого компонента до фокуса  $F_2$  второго компонента;  $d_0$  — значение величины  $d$  в нулевом положении (при  $m=0$ );  $x_2'$  — расстояние от фокуса  $F_2$  до ПИ;  $x_2$  — значение величины  $x_2'$  в нулевом положении;  $\Delta$  — величина смещения ПИ от ее нулевого положения.

Выразим величину смещения плоскости изображения  $\Delta$  в функции параметров оптической системы  $x_0$ ,  $d_0$ ,  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $x_{20}$  и величин  $m$ ,  $i_0$ ,  $i_1$  и  $i_2$  [16]. Используем для величин  $m$  и  $\Delta$  обычное правило знаков, применяемое в теории оптических систем (влево от нулевого положения величины имеют знак минус, вправо — плюс).

Из рис. 3 следует, что

$$\Delta = x_2' - x_{20} + i_2 m; \quad (20)$$

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_0 + i_0 m - i_1 m = x_0 + j m; \\ d &= d_0 + i_2 m - i_1 m = d_0 + \xi m, \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

где  $j = i_0 - i_1$ ;  $\xi = i_2 - i_1$ .

Используя формулу Ньютона, получаем

$$x_2' = \frac{f_2^2}{\frac{f_1^2}{x_0 + j m} + d_0 + \xi m}. \quad (22)$$

Определяя из (22)  $x'_{20}$  и подставляя  $x'_2$  и  $x'_{20}$  в (20), находим выражение для величины смещения ПИ:

$$\Delta = \frac{f_2^2}{\frac{f_1^2}{x_0 + jm} + d_0 + \xi m} - \frac{f_2^2}{\frac{f_1^2}{x_0} + d_0} + i_2 m. \quad (23)$$

Выражение (23) приводится к виду

$$\Delta = \frac{m^3 + c_2^{(2)} m^2 + c_1^{(2)} m}{\frac{m^2}{i_2} + d_1^{(2)} m + d_0^{(2)}} = \frac{f(m)}{\delta(m)}, \quad (24)$$

где 
$$c_2^{(2)} = \frac{1}{i_2 j \xi} [i_2 (\xi x_0 + j d_0) - j \xi x'_{20}];$$

$$c_1^{(2)} = \frac{1}{i_2 j \xi} [j f_2^2 - x'_{20} (\xi x_0 + j d_0) + i_2 (f_1^2 + x_0 d_0)];$$

$$d_1^{(2)} = \frac{\xi x_0 + j d_0}{i_2 \xi j}; \quad d_0^{(2)} = \frac{f_1^2 + x_0 d_0}{i_2 j \xi}.$$

Из формулы (24) можно выразить гауссовы параметры пап-кратической системы  $x'_{20}$ ,  $x_0$ ,  $f_2^2$ ,  $f_1^2$  и  $d_0$  через коэффициенты  $c_1^{(2)}$ ,  $c_2^{(2)}$ ,  $d_0^{(2)}$ ,  $d_1^{(2)}$  и передаточные отношения

$i_0$ ,  $i_1$  и  $i_2$ :

$$x'_{20} = d_1^{(2)} i_2^2 - c_2^{(2)} i_2;$$

$$f_2^2 = i_2 \xi [c_1^{(2)} - d_0^{(2)} i_2 + d_1^{(2)} (d_1^{(2)} i_2^2 - c_2^{(2)} i_2)];$$

$$x_0 = \frac{j (d_1^{(2)} i_2^2 - c_2^{(2)} i_2) d_0^{(2)}}{[c_1^{(2)} - d_0^{(2)} i_2 + d_1^{(2)} (d_1^{(2)} i_2^2 - c_2^{(2)} i_2)]};$$

$$d_0 = \xi \left[ d_1^{(2)} i_2 - \frac{(d_1^{(2)} i_2^2 - c_2^{(2)} i_2) d_0^{(2)}}{c_1^{(2)} - d_0^{(2)} i_2 + d_1^{(2)} (d_1^{(2)} i_2^2 - c_2^{(2)} i_2)} \right];$$

$$f_1^2 = i_2 j \xi d_0^{(2)} - x_0 d_0.$$

(25)

Увеличение СПУ определяется как произведение увеличений первого и второго компонентов системы:

$$\beta = \beta_1 \beta_2 = \left( -\frac{f_1}{x_1} \right) \left( -\frac{f_2}{x_2} \right). \quad (26)$$

Подставив в (26) выражения для  $x_1$  и  $x_2$  из (21) и (22), получим формулу для увеличения СПУ:

$$\beta = - \frac{f_1 f_2}{i_2 j \xi \left[ \frac{m^2}{i_2} + d_1^{(2)} m + d_0^{(2)} \right]} = - \frac{f_1 f_2}{i_2 j \xi \delta(m)}. \quad (27)$$

Следует отметить то обстоятельство, что при постоянных  $i_1$  и  $i_2$  величина  $\Delta$  может принимать значение, равное нулю, не более чем в трех точках, а именно в точках

$$m_1 = 0; \quad m_{2,3} = - \frac{c_2^{(2)}}{2} \pm \sqrt{\frac{c_2^{(2)2}}{4} - c_1^{(2)}}.$$

Следовательно, во всех остальных точках будет иметь место смещение плоскости изображения, и возможны потери резкости изображения при больших значениях величины  $\Delta$ . Поэтому смещение плоскости изображения  $\Delta$  должно быть ограничено по абсолютной величине значением  $\Delta_{\max} = \max |\Delta|$ . В каждом конкретном случае величину  $\Delta_{\max}$  определяют особо, исходя из назначения системы. Например, при использовании СПУ в качестве панкратической системы для зрительной трубы величина  $\Delta_{\max}$  определяется максимально допустимым значением расфокусировки всей системы (например, при расфокусировке системы 2 дптр и фокусном расстоянии окуляра 20 мм  $\Delta_{\max} = 0,8$  мм). Если систему используют в качестве проекционной, величина  $\Delta_{\max}$  определяется значением глубины резкости изображаемого пространства.

Расчет панкратической системы с линейной зависимостью между перемещениями компонентов проводится с целью обеспечения необходимого перепада увеличений  $M$  при заданном значении максимально допустимого перемещения плоскости изображения  $\Delta_{\max}$ , которое определяется назначением СПУ.

Найдем условия, обеспечивающие требуемый перепад и увеличений  $M$  и максимально допустимое смещение плоскости изображения  $\Delta_{\max}$ .

Будем считать, что параметр  $m$  изменяется в диапазоне  $m_1 \leq m \leq m_2$  и значения коэффициентов  $c_1^{(2)}$  и  $c_2^{(2)}$  заданы, т. е. известно максимальное значение по абсолютной величине числителя  $f(m)$  в выражении (24). Максимальное значение числителя для заданного  $\Delta_{\max}$  определяет значение знаменателя в выражении (24), т. е. вместо величины  $\Delta_{\max}$  можно пользоваться однозначно связанной с ней величиной знаменателя  $\delta$  в формуле (24).

Пусть при  $m = m_2$  значение величины

$$\delta = \frac{m_2^2}{i_2} + d_1^{(2)} m_2 + d_0^{(2)}.$$

Для обеспечения нужного перепада увеличений необходимо выполнить следующее условие:

$$\frac{m_1^2}{i_2} + d_1^{(2)} m_1 + d_0^{(2)} = M \delta.$$

Будем считать, что величина  $\delta$  выбрана для заданных коэффициентов  $c_2^{(2)}$  и  $c_1^{(2)}$  таким образом, что обеспечивается получение смещения плоскости изображения в нужных пределах. Тогда условия получения нужного перепада увеличений  $M$  и заданного значения  $\Delta_{\max}$  запишутся в таком виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{m_2^2}{i_2} + d_1^{(2)} m_2 + d_0^{(2)} = \delta; \\ \frac{m_1^2}{i_2} + d_1^{(2)} m_1 + d_0^{(2)} = M\delta. \end{array} \right\} \quad (28)$$

Из (28) находим выражения коэффициентов  $d_1^{(2)}$  и  $d_0^{(2)}$  через величины  $m_1$ ,  $m_2$  и  $i_2$ :

$$\left. \begin{array}{l} d_1^{(2)} = -\frac{m_1 + m_2}{i_2} + \frac{(1 - M)}{m_2 - m_1} \delta; \\ d_0^{(2)} = \frac{m_1 m_2}{i_2} + \frac{m_2 M - m_1}{m_2 - m_1} \delta. \end{array} \right\} \quad (29)$$

Если диапазон изменения величины  $m$  ( $m_1 \leq m \leq m_2$ ) задан, то коэффициенты  $d_1^{(2)}$  и  $d_0^{(2)}$  будут функциями только одного переменного —  $i_2$ .

При  $m_1 = -m_2$  формулы (29) упрощаются:

$$d_1^{(2)} = \frac{(1 - M)}{2m_2} \delta; \quad d_0^{(2)} = -\frac{m_2^2}{i_2} + \frac{(1 + M)}{2} \delta.$$

При  $m_1 = 0$

$$d_1^{(2)} = -\frac{m_2}{i_2} + \frac{(1 - M)}{m_2} \delta; \quad d_0^{(2)} = M\delta.$$

Выражения (24), (25), (27) и (28), полученные для двухкомпонентной панкратической системы, справедливы для оптических систем всех типов (линзовых, зеркальных и зеркально-линзовых). Как известно [2], формула Ньютона для зеркального компонента имеет вид  $f^2 = xx'$ , следовательно, отрицательные значения величин  $f_1^2$  и  $f_2^2$  (т. е. комплексные значения  $f_1$  и  $f_2$ ) в формулах (24) и (25) соответствуют наличию зеркального компонента в панкратической системе.

Проведем исследование возможных областей построения линзовых оптических систем переменного увеличения на плоскости параметров  $i_1$  и  $i_2$  (из трех величин  $i_0$ ,  $i_1$  и  $i_2$  независимые две; будем считать, что  $i_0$  — величина заданная), т. е. найдем область действительных значений фокусных расстояний  $f_1$  и  $f_2$ .

Преобразуем выражение для  $f_1^2$  из (25) к более удобному для исследования виду:

$$f_1^2 = \frac{j\xi i_2 M_1}{[c_1^{(2)} - d_0^{(2)} i_2 + d_1^{(2)} (d_1^{(2)} i_2^2 - c_2^{(2)} i_2)]^2}, \quad (30)$$

где

$$M_1 = d_0^{(2)} [(c_1^{(2)} - d_0^{(2)} i_2)^2 + i_2 (d_1^{(2)} i_2 - c_2^{(2)}) (c_1^{(2)} d_1^{(2)} - c_2^{(2)} d_0^{(2)})] .$$

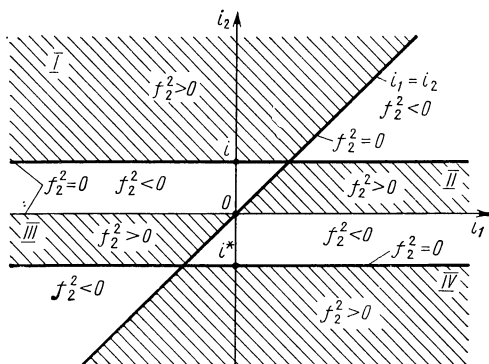
Величина

$$f_2^2 = i_2 (i_2 - i_1) [c_1^{(2)} - d_0^{(2)} i_2 + d_1^{(2)} (d_1^{(2)} i_2^2 - c_2^{(2)} i_2)]$$

равна 0 при следующих условиях:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_2 = 0; \\ i_2 - i_1 = 0; \\ c_1^{(2)} - d_0^{(2)} i_2 + d_1^{(2)} (d_1^{(2)} i_2^2 - c_2^{(2)} i_2) = L = 0. \end{array} \right\} \quad (31)$$

Рис. 4. Области действительных значений  $f_2^2$



Последнее уравнение системы (31) в случае действительных решений относительно  $i_2$  определяет на плоскости параметров  $i_1$  и  $i_2$  две прямые  $i_2 = i$  и  $i_2 = i^*$ , где  $i$  и  $i^*$  действительные решения третьего уравнения в (31).

Условие  $f_2^2 > 0$  на плоскости параметров  $i_1$  и  $i_2$  выражается любой из следующих четырех систем неравенств:

$$\begin{array}{ll} \text{I} \left\{ \begin{array}{l} i_2 > 0; \\ i_2 - i_1 > 0; \\ L > 0; \end{array} \right. & \text{III} \left\{ \begin{array}{l} i_2 < 0; \\ i_2 - i_1 < 0; \\ L > 0; \end{array} \right. \\ \text{II} \left\{ \begin{array}{l} i_2 > 0; \\ i_2 - i_1 < 0; \\ L < 0; \end{array} \right. & \text{IV} \left\{ \begin{array}{l} i_2 < 0; \\ i_2 - i_1 > 0; \\ L < 0. \end{array} \right. \end{array} \quad (32)$$

На рис. 4 нанесены области действительных значений величин  $f_2$ , обозначенные цифрами I, II, III, IV, как и системы неравенств (32).

Область значений величин  $f_1^2 > 0$  определяется следующими системами неравенств:

$$\begin{aligned}
 \text{I} \begin{cases} i_2 > 0; \\ i_2 - i_1 > 0; \\ i_0 - i_1 > 0; \\ M_1 > 0; \end{cases} & \quad \text{II} \begin{cases} i_2 > 0; \\ i_2 - i_1 < 0; \\ i_0 - i_1 > 0; \\ M_1 < 0; \end{cases} & \quad \text{III} \begin{cases} i_2 < 0; \\ i_2 - i_1 > 0; \\ i_0 - i_1 > 0; \\ M_1 < 0; \end{cases} \\
 \text{IV} \begin{cases} i_2 < 0; \\ i_2 - i_1 < 0; \\ i_0 - i_1 > 0; \\ M_1 > 0; \end{cases} & \quad \text{V} \begin{cases} i_2 < 0; \\ i_2 - i_1 < 0; \\ i_0 - i_1 < 0; \\ M_1 < 0; \end{cases} & \quad \text{VI} \begin{cases} i_2 > 0; \\ i_2 - i_1 > 0; \\ i_0 - i_1 < 0; \\ M_1 < 0; \end{cases} \\
 \text{VII} \begin{cases} i_2 > 0; \\ i_2 - i_1 < 0; \\ i_0 - i_1 < 0; \\ M_1 > 0; \end{cases} & \quad \text{VIII} \begin{cases} i_2 < 0; \\ i_2 - i_1 > 0; \\ i_0 - i_1 < 0; \\ M_1 > 0. \end{cases} & \quad (33)
 \end{aligned}$$

Графически области действительных значений  $f_1$  на плоскости параметров  $i_1$  и  $i_2$  представлены на рис. 5.

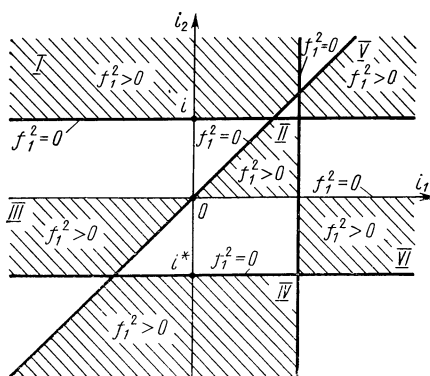


Рис. 5. Области действительных значений  $f_1^2$

Системы неравенств (32) и (33) и определяют те области передаточных отношений  $i_1$  и  $i_2$ , для которых возможно построение линзовых систем переменного увеличения.

Однако для ИК систем большое значение имеет вопрос о построении зеркальных и зеркально-линзовых СПУ. Поэтому исследуем на плоскости параметров  $i_1$  и  $i_2$  области мнимых значений фокусных расстояний  $f_1$  и  $f_2$ , которые соответствуют наличию зеркального компонента в СПУ.

На основании (31) условие  $f_2^2 < 0$  можно записать в таком виде:

$$\text{I} \begin{cases} i_2 > 0; \\ i_2 - i_1 > 0; \\ L < 0; \end{cases} \quad \text{II} \begin{cases} i_2 < 0; \\ i_2 - i_1 > 0; \\ L > 0; \end{cases}$$

$$\text{II} \begin{cases} i_2 > 0; \\ i_2 - i_1 < 0; \\ L > 0; \end{cases} \quad \text{IV} \begin{cases} i_2 < 0; \\ i_2 - i_1 < 0; \\ L < 0. \end{cases} \quad (34)$$

Условие  $f_1^2 < 0$  на основании (30) записывается таким образом:

$$\begin{aligned} \text{I} \begin{cases} i_2 > 0; \\ i_2 - i_1 > 0; \\ i_0 - i_1 > 0; \\ M_1 < 0; \end{cases} & \quad \text{II} \begin{cases} i_2 > 0; \\ i_2 - i_1 > 0; \\ i_0 - i_1 < 0; \\ M_1 > 0; \end{cases} & \quad \text{III} \begin{cases} i_2 > 0; \\ i_2 - i_1 < 0; \\ i_0 - i_1 > 0; \\ M_1 > 0; \end{cases} \\ \text{IV} \begin{cases} i_2 < 0; \\ i_2 - i_1 > 0; \\ i_0 - i_1 < 0; \\ M_1 < 0; \end{cases} & \quad \text{V} \begin{cases} i_2 < 0; \\ i_2 - i_1 > 0; \\ i_0 - i_1 > 0; \\ M_1 > 0; \end{cases} & \quad \text{VI} \begin{cases} i_2 < 0; \\ i_2 - i_1 < 0; \\ i_0 - i_1 < 0; \\ M_1 > 0; \end{cases} & \quad (35) \\ \text{VII} \begin{cases} i_2 > 0; \\ i_2 - i_1 < 0; \\ i_0 - i_1 < 0; \\ M_1 > 0; \end{cases} & \quad \text{VIII} \begin{cases} i_2 < 0; \\ i_2 - i_1 < 0; \\ i_0 - i_1 > 0; \\ M_1 < 0. \end{cases} \end{aligned}$$

Следовательно, неравенства (32) и (33) определяют области параметров  $i_1$  и  $i_2$ , для которых возможно построение линзовых систем переменного увеличения; неравенства (32) и (35), (33) и (34), (34) и (35) определяют области, для которых можно построить зеркально-линзовые и зеркальные системы переменного увеличения. Область параметров, определяемая неравенствами (34) и (35), соответствует зеркальным системам; область, определяемая неравенствами (32) и (35), — зеркально-линзовым (первый компонент линзовый, второй зеркальный); область, определяемая неравенствами (34) и (33), соответствует зеркально-линзовым системам, в которых первый компонент зеркальный, а второй линзовый.

Нанося на плоскости передаточных отношений  $i_1$ ,  $i_2$  области, соответствующие неравенствам (32), (33), (34) и (35), получим области параметров  $i_1$  и  $i_2$ , при которых возможно построение линзовых, зеркально-линзовых или зеркальных систем. На рис. 6 приведены области, соответствующие всем четырем системам неравенств для случая  $c_2^{(2)}=0$ ;  $c_1^{(2)}=1$ ;  $d_1^{(2)}=10$ ;  $d_0^{(2)}=-\frac{1}{i_2}+15$ .

Эти значения коэффициентов соответствуют перепаду увеличений  $M=5$ ;  $m=\pm 1$ ;  $\max|\Delta| \approx 0,047$ .

Плоскость параметров  $i_1$  и  $i_2$  разбилась на 10 областей: I, II, III — области возможного построения линзовых систем; IV, V — области зеркальных систем; VI, VII, IX — области зеркально-линзовых систем с зеркальным первым компонентом; VIII, X — области зеркально-линзовых систем со вторым зеркальным компонентом.

Если, например, требуется построить зеркально-линзовую систему переменного увеличения со вторым зеркальным компонентом, то передаточные отношения можно выбирать в областях VIII, X. Построим систему переменного увеличения для  $i_1$  и  $i_2$  из области IV.



Пусть, например,  $i_0=1$ ;  $i_1=0,4$ ;  $i_2=0,2$ . Для этих передаточных отношений имеем следующие параметры оптической системы:  $x'_{20}=-0,4$ ;  $f_2^2=-0,04$ ;  $x_0=-2,4$ ;  $d_0=-0,4$ ;  $f_1^2=-1,2$ ;  $|\beta|=1,825 \div 0,365$ .

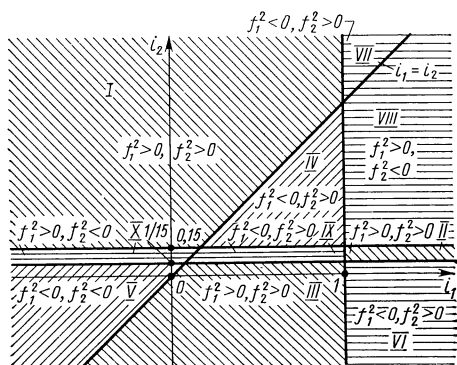


Рис. 6. Области построения зеркальных, зеркально-линзовых и линзовых систем

Построенные по этим параметрам панкратические системы приведены на рис. 7. Аналогично легко построить и системы переменного увеличения, в которых зеркальным будет один первый или второй компонент.

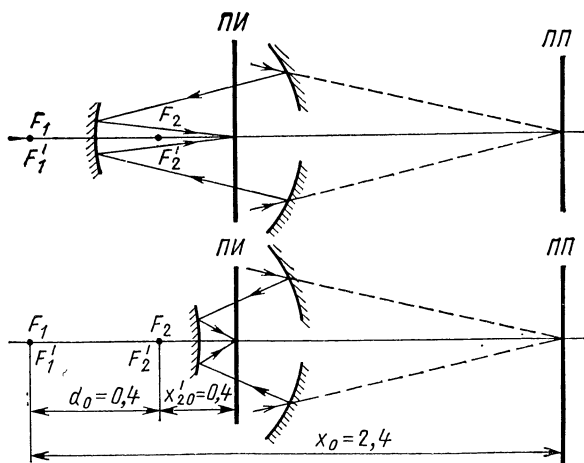


Рис. 7. Схемы зеркальных панкратических систем

При общем анализе двухкомпонентной панкратической системы, когда одновременно перемещаются предметная плоскость ПП, а также первый и второй компоненты с передаточными отношения-

ми  $i_1$  и  $i_2$ , можно выделить следующие частные случаи возможных систем переменного увеличения.

Случай «а» ( $i_1=0$ ) — перемещаются плоскость предмета ПП и второй компонент с передаточным отношением  $i_2/i_0$  относительно перемещения предметной плоскости. В этом случае кинематическая связь получается наиболее простой при  $i_2=1$  (одновременное перемещение плоскости предмета и второго компонента на одну и ту же величину). Такие системы переменного увеличения можно характеризовать коэффициентами  $j=i_0$  и  $\xi=i_2$ .

Случай «b» ( $i_0=0$ ) — предметная плоскость неподвижна, перемещаются только первый и второй компоненты оптической системы. В данном случае система характеризуется коэффициентами  $j=-i_1$ ;  $\xi=i_2-i_1$ .

Случай «с» ( $i_2=0$ ) — перемещаются предметная плоскость и первый компонент системы; второй компонент при этом неподвижен. Эта система полностью определяется коэффициентами  $j=i_0-i_1$ ;  $\xi=-i_1$ .

Как показывает исследование формул (25), наиболее удобно рассчитывать и исследовать систему при равенстве нулю передаточного отношения  $i_1$  (случай «а»), потому что переход от системы с передаточным отношением  $i_1 \neq 0$  осуществляется простым умножением величин  $x'_{20}$ ,  $f_2^2$ ,  $d_0$ ,  $x_0$ ,  $f_1^2$ , полученных при расчете систем с неподвижным первым компонентом, на коэффициенты, приведенные в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Система, определяемая коэффициентами $j$ и $\xi$	Коэффициенты перехода для					
	$x'_{20}$	$f_2^2$	$d_0$	$x_0$	$f_1^2$	$\beta$
$j = i_0 - i_1$ $\xi = i_2 - i_1$	1	$\frac{i_2 - i_1}{i_2}$	$\frac{i_2 - i_1}{i_2}$	$i_0 - i_1$	$(i_0 - i_1) \times \frac{i_2 - i_1}{i_2}$	$\frac{1}{\sqrt{ i_0 - i_1 }}$
$j = -i_1$ $\xi = i_2 - i_1$				$-i_1$	$(-i_1) \times \frac{i_2 - i_1}{i_2}$	$\frac{1}{\sqrt{ i_1 }}$

Анализ табл. 2 позволяет заключить, что наиболее подробно следует исследовать частный случай «а» (случай неподвижного первого компонента). Имея параметры рассчитанных панкратических систем, соответствующих случаю «а», легко построить и панкратические системы с неподвижной предметной плоскостью (случай «b») или системы общего вида.

## Система переменного увеличения с неподвижным первым компонентом (случай «а»)

Схема такой панкратической системы представлена на рис. 8. В рассматриваемом частном случае выражения для коэффициентов  $c_2^{(2)}$ ,  $c_1^{(2)}$ ,  $d_1^{(2)}$  и  $d_0^{(2)}$  в формуле (24) для  $\Delta$  будут такими:

$$c_2^{(2)} = \frac{1}{i_2} \left( d_0 + i_2 x_0 - \frac{f_2^2 x_0}{f_1^2 + x_0 d_0} \right);$$

$$c_1^{(2)} = \frac{1}{i_2^2} \left[ f_2^2 - \frac{f_2^2 x_0}{f_1^2 + x_0 d_0} (d_0 + i_2 x_0) + i_2 (f_1^2 + x_0 d_0) \right];$$

$$d_1^{(2)} = \frac{1}{i_2^2} (d_0 + i_2 x_0); \quad d_0^{(2)} = \frac{1}{i_2^2} (f_1^2 + x_0 d_0).$$

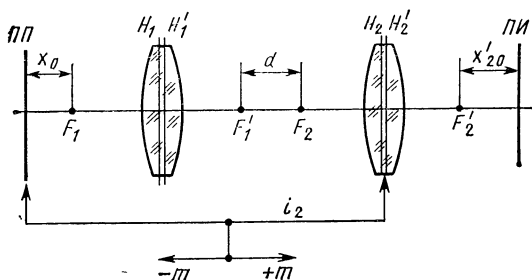


Рис. 8. Схема двухкомпонентной панкратической системы при  $i_1=0$

Формулы (25) для выражения параметров оптической системы через коэффициенты  $c_2^{(2)}$ ,  $c_1^{(2)}$ ,  $d_1^{(2)}$  и  $d_0^{(2)}$  и передаточное отношение  $i_2$  в этом случае принимают наиболее простой вид:

$$f_2^2 = i_2^2 [c_1^{(2)} - d_0^{(2)} i_2 + d_1^{(2)} (d_1^{(2)} i_2^2 - c_2^{(2)} i_2)];$$

$$x_0 = \frac{d_0^{(2)} (d_1^{(2)} i_2^2 - c_2^{(2)} i_2)}{c_1^{(2)} - d_0^{(2)} i_2 + d_1^{(2)} (d_1^{(2)} i_2^2 - c_2^{(2)} i_2)}; \quad (36)$$

$$d_0 = d_1^{(2)} i_2^2 - i_2 x_0; \quad x'_{20} = d_1^{(2)} i_2^2 - c_2^{(2)} i_2;$$

$$f_1^2 = d_0^{(2)} i_2^2 \frac{(c_1^{(2)} - d_0^{(2)} i_2)^2 + c_1^{(2)} d_1^{(2)2} i_2^2}{(c_1^{(2)} - d_0^{(2)} i_2 + d_1^{(2)2} i_2^2)^2}.$$

Увеличение оптической системы выражается формулой:

$$\beta = - \frac{f_1 f_2}{i_2^2 \left( \frac{m^2}{i_2} + d_1^{(2)} m + d_0^{(2)} \right)}. \quad (37)$$

Условия перепада и ошибки будут выражаться, как и в общем случае, формулами (28).

Как указывалось выше, при расчете параметров панкратической системы исходят из необходимости выполнения следующих двух условий: 1) система должна обеспечивать заданный перепад увели-

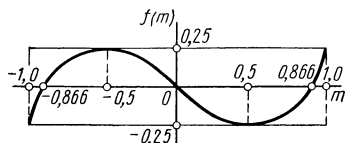


Рис. 9. График полинома Чебышева 3-й степени

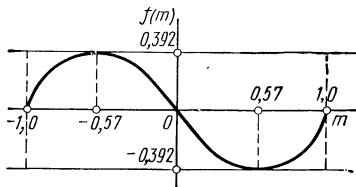


Рис. 10. График функции  $f(m) = m^3 - m$

чений  $M$ ; 2) максимальное значение  $\Delta$  смещения ПИ не должно превышать заданного значения  $\max |\Delta| = \Delta_{\max}$ , определяемого назначением панкратической системы. Поэтому при расчете удобно задать коэффициенты  $c_2^{(2)}$  и  $c_1^{(2)}$ . Поскольку желательно иметь смещение ПИ по возможности минимальным, то числитель выражения (23) следует выбирать в форме полинома Чебышева, наименее уклоняющегося от нуля, что обеспечивает минимальное значение величины  $m^3 + c_2^{(2)} m^2 + c_1^{(2)} m$  заданном интервале изменения  $m_1 \leq m \leq m_2$  из всех полиномов 3-й степени. Для полинома Чебышева [43], наименее уклоняющегося от нуля в интервале  $-1 \leq m \leq 1$ ;  $c_2^{(2)} = 0$ ;  $c_1^{(2)} = -\frac{3}{4}$   $f(m) = m^3 - \frac{3}{4} m$ . График полинома для  $-1 \leq m \leq 1$  представлен на рис. 9. Максимальное отклонение от нуля составляет  $1/4$ .

Однако часто (особенно в визуальных приборах) требуется, чтобы величина  $\Delta$  равнялась нулю при минимальном и максимальном увеличениях системы. В этом случае числителем выражения (23) будет полином  $f(m) = m^3 - m$ , график которого представлен на рис. 10. В этом случае максимум величины  $f(m)$  возрастает примерно в 1,5 раза, однако величина  $\Delta_{\max}$  будет несколько меньше. Например, возьмем  $i_2 = 1$ ;  $d_2^{(2)} = -12,5$ ;  $d_0^{(2)} = 16,5$ ;  $\delta = 5$ ;  $M = 6$ . Если в числителе выражения (23) взят полином Чебышева, то максимальное значение  $\Delta_{\max} \approx 1/20$  (при  $m = 1$ ), а для числителя с  $c_2^{(2)} = 0$ ,  $c_1^{(2)} = -1$   $\Delta_{\max} = 0,0392$ , т. е. в 1,25 раза меньше.

Расчет параметров панкратических систем можно вести, считая, что переменный параметр  $m$ , характеризующий величины перемещений компонентов, изменяется в интервале  $0 \leq m \leq 1$ . В этом

случае в качестве числителя выражения (23) можно взять полином Чебышева с нулевой точкой, наименее уклоняющийся от нуля на отрезке  $0 \leq m \leq 1$ :  $c_3^{(2)} = 1$ ;  $c_2^{(2)} = -1,3923$ ;  $c_1^{(2)} = 4308$ ;  $c_0^{(2)} = 0$ ; максимальное отклонение полинома от нуля  $\max f(m) = 0,0385$ ; точки наибольшего отклонения соответствуют  $m$ , равному 0,1961; 0,7320 и 1.

Иногда в качестве числителя выражения (23) выбирают полином третьей степени с заданными значениями параметра  $m$ , при

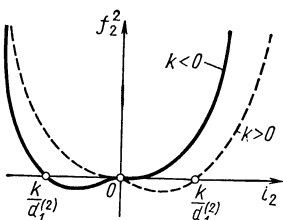


Рис. 11. График  $f_2^2(i_2)$  при  $d_1^{(2)} = \text{const}$

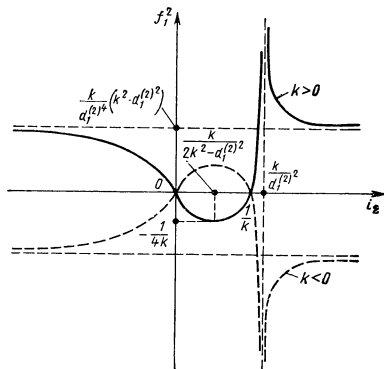


Рис. 12. График  $f_1^2(i_2)$  при  $d_1^{(2)} = \text{const}$

которых этот полином равен нулю (это обусловлено обычно необходимостью обеспечить неподвижность плоскости изображения в заданных положениях).

Исследуем подробнее свойства панкратических систем при  $m = m_2 = -m_1 = 1$ ;  $c_2^{(2)} = 0$ ;  $c_1^{(2)} = -1$ . В этом случае на основании (25) параметры оптической системы можно выразить следующими формулами:

$$\left. \begin{aligned} x'_{20} &= d_1^{(2)} i_2^2; \quad f_2^2 = i_2^3 (d_1^{(2)2} i_2 - k); \quad x_0 = \frac{d_1^{(2)} (k i_2 - 1)}{d_1^{(2)2} i_2 - k}; \\ d_0 &= \frac{d_1^{(2)} i_2 (d_1^{(2)2} i_2^2 - 2k i_2 + 1)}{d_1^{(2)2} i_2 - k}; \\ f_1 &= (k^2 - d_1^{(2)2}) \frac{i_2 (k i_2 - 1)}{(d_1^{(2)2} i_2 - k)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

Графики функции  $f_2^2 = f_2^2(i_2)$  представлены на рис. 11 для  $k > 0$  и  $k < 0$ . Графики функции  $f_1^2 = f_1^2(i_2)$  представлены на рис. 12.

Анализируя графики на рис. 11 и 12, можно сделать следующие выводы.

1. При  $k < 0$  ( $\delta < 0$ ) величины  $f_1$  и  $f_2$  одновременно не могут иметь действительные значения. Следовательно, построение линзовых

систем переменного увеличения в этом случае невозможно (можно построить зеркально-линзовые панкратические системы).

2. При  $k > 0$ , линзовые системы могут быть построены для всех значений  $i_2$ , кроме участка, где  $i_2 = 0 \div \frac{k}{d_1^{(2)^2}}$ .

3. При  $i_2 < 0$

$$f_1^2 \leq \frac{k}{d_1^{(2)^4}} (k^2 - d_1^{(2)^2}) = \frac{8M(1+M)}{(1-M)^4 \delta}, \text{ а при } i_2 > \\ > \frac{k}{d_1^{(2)^2}} \quad f_1^2 \geq \frac{8M(1+M)}{(1-M)^4 \delta}.$$

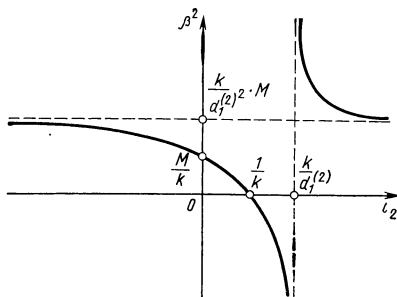


Рис. 13. График функции  $\beta^2(i_2)$  при  $d_1^{(2)} = \text{const}$

4. На участке  $i_2 > \frac{k}{d_1^{(2)^2}}$  для заданных значений  $M$  и  $\delta$  можно построить оптическую систему из одинаковых компонентов ( $f_1 = f_2$ ). Величина  $i_2$ , при которой выполняется условие  $f_1 = f_2$ , определяется из уравнения

$$i_2^2 (d_1^{(2)^2} i_2 - k)^3 = (k^2 - d_1^{(2)^2}) (k i_2 - 1).$$

График функции  $\beta^2 = \beta^2(i_2)$  для  $m=1$  представлен на рис. 13. Графики функции  $x_0$  представлены на рис. 14 для  $k > 0$  при  $d_1^{(2)} > 0$  и  $d_1^{(2)} < 0$ . Из рисунка видно, что в области построения возможных линзовых систем  $x_0 > 0$  при  $d_1^{(2)} > 0$  и  $x_0 < 0$  при  $d_1^{(2)} < 0$ . Так как мы рассматриваем систему при  $k > 0$  ( $\delta > 0$ ), то  $d_1^{(2)} > 0$  при  $M < 1$ , а  $d_1^{(2)} < 0$  при  $M > 1$ . Следовательно, при  $m_2=1$  увеличение будет по абсолютной величине минимальным, если  $M < 1$  ( $d_1^{(2)} > 0$ ) и максимальным, если  $M > 1$  ( $d_1^{(2)} < 0$ ). Из (38) видно, что при измене-

ний знака коэффициента  $d_1^{(2)}$  величины  $x_{20}$ ,  $x_0$  и  $d_0$  также меняют знак на обратный (знак этих величин совпадает со знаком величины  $d_1^{(2)}$ , не изменяясь по абсолютному значению, а на величины  $f_1^2$  и  $f_2^2$  знак коэффициента  $d_1^{(2)}$  не влияет. Из формул (37) и (38) следует, что величина  $\beta^2 = \beta^2(i_2)$  при  $m_2 = 1$  совпадает с точностью до постоянного множителя с величиной  $x_0$ , а именно:

$$\beta^2 = \frac{k^2 - d_1^{(2)2}}{\delta^2 d_1^{(2)}} x_0 = \frac{M}{d_1^{(2)}} x_0. \quad (39)$$

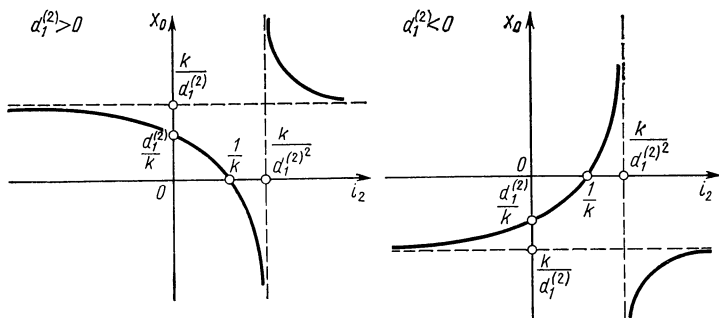


Рис. 14. График функции  $x_0(i_2)$  при  $k > 0$

Из формулы (39) следует, что отношение  $\frac{\beta^2(i_2)}{x_0(i_2)} = \frac{M}{d_1^{(2)}}$  и зависит только от величины перепада увеличений и коэффициента  $d_1^{(2)}$  и не зависит от передаточного отношения  $i_2$ .

График функции  $d_0 = d_0(i_2)$  представлен на рис. 15 для  $d_1^{(2)} > 0$  и  $d_1^{(2)} < 0$ . Величина  $d_0$  согласно (38) равна нулю (афокальная система при  $m=0$ ) в трех точках:

$$i'_0 = 0; \quad i'_1 = \frac{k}{d_1^{(2)2}} - \sqrt{\frac{k^2}{d_1^{(2)2}} - 1}; \quad i'_2 = \frac{k}{d_1^{(2)2}} + \sqrt{\frac{k^2}{d_1^{(2)2}} - 1}.$$

Из рис. 15 видно, что для  $i_2 < 0$  и  $i'_2 > i'_2 = \frac{k}{d_1^{(2)2}} + \sqrt{\frac{k^2}{d_1^{(2)2}} - 1}$ ; как и для величин  $x_0$  и  $x_{20}$ , знак величины  $d_0$

совпадает со знаком коэффициента  $d_1^{(2)}$ . Из (38) следует, что при этом абсолютная величина  $d_0$  не изменяется.

Из рассмотренного выше можно сделать следующие выводы.

1. При расчете линзовых панкратических систем для рассматриваемого частного случая следует анализировать только системы при  $k > 0$  ( $\delta > 0$ ). Причем интервал  $i_2 = 0 \div \frac{k}{d_1^{(2)^2}}$  для построения линзовых систем переменного увеличения в этом случае не пригоден.

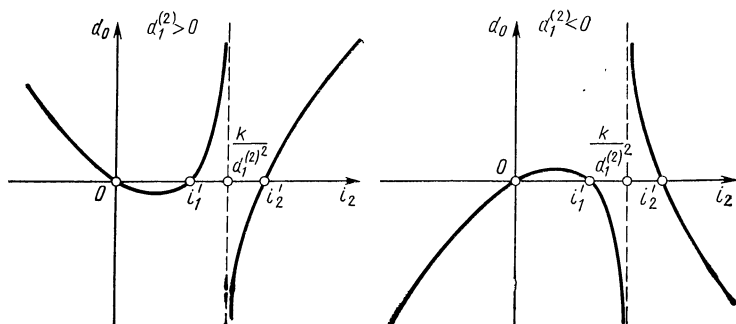


Рис. 15. График функции  $d_0(i_2)$

2. При  $i_2 < 0$  величина  $f_1^2$  ограничена снизу, при  $i_2 > \frac{k}{d_1^{(2)^2}}$

— сверху.

3. На участке  $i_2 > \frac{k}{d_1^{(2)^2}}$  можно построить линзовую систему из компонентов, имеющих одинаковые фокусные расстояния  $f_1$  и  $f_2$ .

4. Знаки параметров оптической системы  $x'_{20}$ ,  $x_0$  и  $d_0$  совпадают со знаком коэффициента  $d_1^{(2)}$  при  $i_2 > i_2'$  и  $i_2 < 0$ . Они положительны, когда минимальное увеличение будет при  $m=1$ , и отрицательны, когда минимальное увеличение будет при  $m=-1$ .

5. Для  $i_2 > i_2'$  и  $i_2 < 0$  расчет линзовых систем можно вести только для  $d_1^{(2)} > 0$ . При  $d_1^{(2)} < 0$  параметры системы  $x'_{20}$ ,  $x_0$  и  $d_0$  остаются по величине такими же, как и при  $d_1^{(2)} > 0$ , но изменяют знак на противоположный. Величины  $f_1^2$  и  $f_2^2$  имеют одно и то же значение при  $d_1^{(2)} > 0$  и  $d_1^{(2)} < 0$ .

Представляет практический интерес рассмотрение панкратических систем, в которых перепад увеличений от нулевого положения ( $m=0$ ) в крайние ( $m=\pm 1$ ) одинаков и равен  $\sqrt{M}$ .



Это условие выполняется, если в формуле (37) для увеличения системы коэффициент  $d_0^{(2)}$  равен  $+\delta\sqrt{M}$ . Учитывая сказанное, из (29) получаем  $d_0^{(2)} = \pm\sqrt{M}\delta = \frac{1}{i_2} + k\delta$  или  $\delta i_2 = y =$

$= \frac{2}{(1 \mp \sqrt{M})^2}$ . В последнем выражении рациональнее брать знак минус, что позволяет получить меньшие смещения ПИ.

Формулы (36) дают возможность рассчитать все параметры панкратической системы, если заданы величины  $M$ ,  $\delta$ ,  $i_2$ ,  $i_0$ ,  $c_1^{(2)}$ ,  $c_2^{(2)}$ .

Для случая трехточечной компенсации смещения ПИ (в точках  $m_1=1$ ;  $m_2=0$ ;  $m_3=-1$ , т. е. при  $c_2^{(2)}=0$  и  $c_1^{(2)}=-1$ ) формулы (24), (36) и (37) принимает наиболее простой вид:

$$x'_{20} = \frac{1 + \sqrt{M}}{1 - \sqrt{M}} i_2; \quad x_0 = \frac{1 + \sqrt{M}}{1 - \sqrt{M}}; \quad d_0 = 0; \quad f_2^2 = i_2^2 \sqrt{M} \cdot y;$$

$$f_1^2 = i_2 \sqrt{M} \cdot y;$$

$$\beta = \frac{\beta(0) \frac{2\sqrt{M}}{(1 - \sqrt{M})^2}}{m^2 + \frac{1 + \sqrt{M}}{1 - \sqrt{M}} m + \frac{2\sqrt{M}}{(1 - \sqrt{M})^2}};$$

$$\Delta = i_2 \frac{m^3 - m}{m^2 + \frac{1 + \sqrt{M}}{1 - \sqrt{M}} m + \frac{2\sqrt{M}}{(1 - \sqrt{M})^2}}; \quad y = \frac{2}{(1 \mp \sqrt{M})^2}.$$

Анализируя эти формулы, можно сделать следующие выводы, характеризующие свойства таких панкратических систем:

1. Рассматриваемые панкратические системы в нулевом положении представляют собой телескопические системы ( $d_0=0$ ). Такие системы удобны в сборке, их относительно легко юстировать по известным методикам с помощью стандартной контрольно-юстировочной аппаратуры.

2. Увеличение системы относительно равномерно меняется при перемещении компонентов.

3. Положение предметной плоскости  $x_0$  в таких системах зависит только от величины перепада увеличений  $M$  и не зависит от передаточного отношения  $i_2$ , характеризующего перемещение второго компонента  $i_2 m$  относительно предметной плоскости  $i_0 m$ .

4. Отношение фокусных расстояний компонентов определяется для любого  $M$  только величиной передаточного отношения  $i_2$ .

Меняя  $i_2$ , можно выбрать компоненты, имеющие заданное отношение оптических сил.

5. При передаточном отношении  $i_2=1$  фокусные расстояния компонентов по абсолютной величине равны.

6. Увеличение системы в нулевом положении связано с передаточным отношением  $i_2$  зависимостью  $i_2 = \beta^2(0)$ , т. е. передаточное отношение  $i_2$  равно продольному увеличению системы при  $m=0$ . Если нужно получить изменение увеличения в диапазоне  $\sqrt{M} \gg \beta \gg \frac{1}{\sqrt{M}}$ , то следует выбрать  $i_2 = 1$  ( $\beta(0) = 1$ ).

7. При величине передаточного отношения  $i_2 < 0$  панкратическая система обязательно зеркально-линзовая, так как второй компонент всегда линзовый ( $f_2^2 > 0$ ).

8. Длина таких систем в нулевом положении (расстояние между компонентами)  $L = f_1' + f_2'$ .

9. Для заданного перепада увеличений  $M$  максимальное смещение ПИ прямо пропорционально передаточному отношению  $i_2$  (т. е. при  $i_2 = 0,1$  величина  $\Delta_{\max}$  в 10 раз меньше, чем при  $i_2 = 1$ ).

10. Системы наименьшей длины получаются при  $i_2 = \left( \frac{f_0^2}{f_0^2 + 1} \right)^2$ , если  $f_1' > 0$  и  $f_2' < 0$ , и при  $i_2 = \left( \frac{f_0^2}{f_0^2 - 1} \right)$ , если  $f_1' < 0$  и  $f_2' > 0$ , где

$$f_0^2 = \sqrt{M} \cdot y = \frac{2\sqrt{M}}{(1 - \sqrt{M})^2}.$$

## Использование дробей Чебышева, наименее уклоняющихся от нуля, при расчете гауссовых элементов панкратических систем

Выражение (23) для смещения плоскости изображения  $\Delta$  представляет собой дробь двух полиномов (третьей и второй степеней). Поэтому наиболее строго с математической точки зрения задачу расчета гауссовых элементов панкратической системы следует ставить так: заданы величина перепада увеличений  $M$  и максимально допустимое смещение ПИ, требуется рассчитать параметры панкратической системы, обеспечивающие эти характеристики. При такой постановке этой задачи для ее решения целесообразно использовать дроби Чебышева, наименее уклоняющиеся от нуля на заданном отрезке.

Покажем, как для двухкомпонентной СПУ, используя дроби Чебышева, наименее уклоняющиеся от нуля, найти коэффициенты выражения (23).

На основании (23) для двухкомпонентной СПУ при неподвижном первом комплекте и перемещающихся предметной плоскости и втором компоненте с передаточным отношением  $i_2$  имеем [16, 22]

$$\Delta = \frac{m^3 + c_2^{(2)} m^2 + c_1^{(2)} m}{\frac{m^2}{i_2} + d_1^{(2)} m + d_0^{(2)}}.$$

Числитель дроби Чебышева для рассматриваемого случая имеет вид [43]

$$\begin{aligned}
 U = m^3 - & \frac{\frac{h^2}{\alpha_1} + \frac{h^2}{\alpha_2} + \frac{h^2}{\alpha_2} \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} + \frac{h^2}{\alpha_1} \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_2^2}}}{1 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_2^2}} + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_2^2}}} - \\
 & - \left[ 1 - \frac{1 + \frac{h^2}{\alpha_1 \alpha_2}}{1 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_2^2}} + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_2^2}}} \right] h^2 m + \\
 & + \frac{\frac{h^2}{\alpha_2} \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} + \frac{h^2}{\alpha_1} \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_2^2}}}{1 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_2^2}} + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_2^2}}} h^2.
 \end{aligned} \tag{40}$$

Для рассматриваемого случая условия обеспечения перепада увеличений  $M$  и максимального смещения плоскости изображения  $L$  записываются так:

$$\begin{aligned}
 d_0^{(2)} &= \frac{1+M}{1-M} h d_1^{(2)} - \frac{h^2}{i_2}; \\
 L &= \frac{h^3}{d_0^{(2)} \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} \right] \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_2^2}} \right]}, \tag{41}
 \end{aligned}$$

где

$$d_0^{(2)} = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{i_2}; \quad d_1^{(2)} = -\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{i_2}.$$

Обозначим  $\sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} = x$  и  $\sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_2^2}} = y$  и запишем уравнения (41) в переменных  $x$  и  $y$ .

Возводя  $d_1^{(2)}$  в квадрат и используя первое уравнение из (41), получим

$$d_0^{(2)} = \frac{h^2}{2(n^2 - 1)i_2} \left\{ \frac{1 - x^2 + 1 - y^2 - n^2[(1 - x^2)(1 - y^2) + 1]}{(1 - x^2)(1 - y^2)} \right\}, \quad (42)$$

где

$$n = \frac{1 - M}{1 + M}.$$

Из второго уравнения (41) найдем  $d_0^{(2)}$  и подставим в (42):

$$2(n^2 - 1)hi_2(1 - x)(1 - y) = L\{(1 - x^2) + (1 - y^2) - n^2[(1 - x^2)(1 - y^2) + 1]\}. \quad (43)$$

Возводя второе уравнение в (41) в квадрат и подставляя в него выражение для  $d_0^{(2)}$  в переменных  $x$  и  $y$ , получаем

$$L^2 = \frac{h^2 i_2^2 (1 - x)(1 - y)}{(1 + x)(1 + y)}. \quad (44)$$

На основании (44) выразим  $x$  через  $y$ :

$$x = \frac{c - by}{b - cy}, \quad (45)$$

где

$$b = i_2^2 h^2 + L^2; \quad c = i_2^2 h^2 - L^2.$$

Подставляя (45) в (43), получаем уравнение четвертой степени относительно  $y$ :

$$\begin{aligned} [c^2 + n^2(b^2 - c^2)]y^4 + [abc - ac^2 - 2bc]y^3 + [c^2n^2 + 2(1 - n^2) \times \\ \times (b^2 - c^2) - ab(b - c)]y^2 + [2bc(1 - n^2) - ac(b - c)]y + [ab(b - c) + \\ + b^2(n^2 - 1) + (n^2 - 1)(b^2 - c^2)] = 0, \end{aligned} \quad (46)$$

где

$$a = \frac{2hi_2}{L}(n^2 - 1).$$

Решая уравнение (46), находим  $y$ , а затем по формуле (45)  $x$ . Зная  $x$  и  $y$ , определяем корни  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , по которым из (40) находим коэффициенты  $c_0$ ,  $c_1$  и  $c_2$  при степенях  $m$  ( $U = m^3 + c_2m^2 + c_1m + c_0$ ), а также величины  $d_0^{(2)}$  и  $d_1^{(2)}$ .

Для определения параметров СПУ воспользуемся формулами (25). По коэффициентам  $c_0$ ,  $c_1$  и  $c_2$  найдем коэффициенты  $c_1^{(2)}$  и  $c_2^{(2)}$ .

Для того чтобы привести выражение (23) к дроби, где числитель имеет вид (40), нужно сместить начало отсчета  $\Delta$  на величину  $\Delta_0$ :

$$\frac{m^3 + c_2^{(2)} m^2 + c_1^{(2)} m}{\frac{m^2}{i_2} + d_1^{(2)} m + d_0^{(2)}} + \Delta_0 = \frac{m^3 + c_2 m^2 + c_1 m + c_0}{\frac{m^2}{i_2} + d_1^{(2)} m + d_0^{(2)}}.$$

Из последнего выражения получаем

$$\Delta_0 = \frac{c_0}{d_0^{(2)}}; \quad c_1^{(2)} = c_1 - \Delta_0 d_1^{(2)}; \quad c_2^{(2)} = c_2 - \frac{\Delta_0}{i_2}.$$

Для коэффициентов  $c_1^{(2)}$ ,  $c_2^{(2)}$ ,  $d_0^{(2)}$ ,  $d_1^{(2)}$  по формулам (25) находим параметры панкратической системы, имеющей перепад увеличений  $M$  и  $\Delta_{\max} = L$ .

**Пример.** Пусть  $M=15$ ;  $h=1$ ;  $L=0,01$ ;  $i_2=0,1$ . При этом уравнение (46) имеет вид  $y^4=2,0704y^3+0,8546y^2+0,5555y-0,3395=0$  и имеет решения  $y_1=-0,5325$ ;  $y_2=0,75$ ;  $y_3=0,86$ ;  $y_4=0,994$ . Коэффициенты  $c_k^{(2)}$  и  $d_k^{(2)}$  (при  $y_3=0,86$ ):  $d_0^{(2)}=30$ ;  $d_1^{(2)}=-35$ ;  $c_1^{(2)}=-0,2503$ ;  $c_2^{(2)}=-0,7471$   $\Delta_0=0,00972$ . Параметры панкратической системы:  $x'_{20}=-0,2752$ ;  $f_2^2=0,0638$ ;  $x_0=-1,294$ ;  $d_0=-0,2206$ ;  $f_1^2=0,0145$ . Смещения плоскости изображения  $\Delta$  приведены в табл. 3.

Таблица 3

$m$	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0
$\delta$	5	8,4	12,6	17,6	23,4	30
$\Delta$	0,01	-0,01	-0,0065	0,0008	0,0066	0,0097

Продолжение табл. 3

$m$	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1
$\delta$	37,4	45,6	54,6	64,4	75
$\Delta$	0,0098	0,0078	0,0035	-0,0025	-0,01

Изменяя величину передаточного отношения  $i_2$ , получают ряд систем, из которых можно выбрать одну, пригодную для дальнейшего расчета. Поскольку при расчете имеется один свободный параметр  $i_2$ , то можно наложить еще одно условие (например, задать увеличение системы в одном из положений, длину системы и т. д.).

Необходимо отметить следующее. Имея параметры системы, обеспечивающей заданный перепад  $M$  и смещение плоскости изображения  $\Delta_{\max}$ , можно пересчитать параметры этой системы, используя дробь Чебышева, наименее уклоняющуюся от нуля, с целью уменьшения величины  $\Delta_{\max}$  (расчеты показывают, что в этом случае величина  $\Delta_{\max}$  может быть уменьшена в 2—3 раза).

## Определение параметров панкратической системы наименьшей длины

Двухкомпонентную панкратическую систему называют системой наименьшей длины, если в одном из крайних положений главные плоскости ее первого и второго компонентов совпадают. В этом случае величина  $d$  равна сумме фокусных расстояний  $f_1$  и  $f_2$  первого и второго компонентов (рис. 16). Следовательно, условие получения системы наименьшей длины имеет вид

$$d = f_1 + f_2. \quad (47)$$

Если  $i_1 \leq 0$  и  $i_2 > 0$ , условие (47) должно выполняться при  $m = -1$ :

$$f_1 + f_2 = d_0 - i_2 + i_1. \quad (48)$$

Покажем, например, как выбранную систему переменного увеличения, соответствующую случаю «а», с заданным передаточным отношением  $i_2$  сделать системой наименьшей длины. Условие (48) с учетом перехода от рассматриваемой системы к общему случаю переписывается в таком виде:

$$\sqrt{(i_0 - i_1) \frac{i_2 - i_1}{i_2}} f_{1a} + \sqrt{\frac{i_2 - i_1}{i_2}} f_{2a} = \frac{i_2 - i_1}{i_2} d_0 - i_2 + i_1,$$

где  $f_{1a}$  и  $f_{2a}$  — фокусные расстояния компонентов для случая «а». Выполнив несложные преобразования, получаем

$$(i_2 - i_1) \left[ \frac{d_0}{\sqrt{i_2}} - \sqrt{i_2} \right]^2 = (i_0 - i_1) f_{1a}^2 + 2 f_{1a} f_{2a} \sqrt{i_0 - i_1} + f_{2a}^2.$$

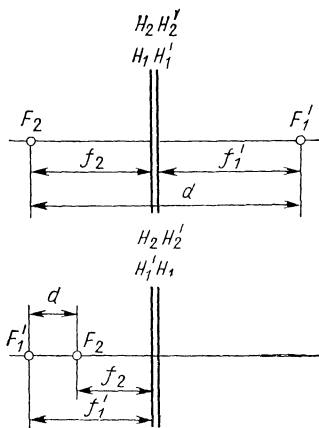


Рис. 16. Схемы панкратических систем наименьшей длины

Заменяя  $(i_0 - i_1)$  на  $y^2$ , получаем квадратное уравнение относительно  $y$ :

$$y^2 \left[ \frac{(d_0 - i_2)^2}{i_2} - f_{1a}^2 \right] - 2f_{1a}f_{2a}y + (i_2 - 1) \frac{(d_0 - i_2)^2}{i_2} - f_{2a}^2 = 0. \quad (49)$$

Решая его, находим  $y$ , а затем и значение  $i_1$ , при котором система имеет наименьшую длину.

Если предметная плоскость системы неподвижна, то в уравнении (48) нужно положить  $i_0 = 0$ . Тогда, решая квадратное уравнение (49), найдем  $i_1$ , определяющее систему наименьшей длины для случая «b». Определение параметров панкратической системы наименьшей длины с неподвижным первым компонентом ( $i_1 = 0$ ) изложено в работе [16], в которой рассчитаны параметры панкратической системы наименьшей длины для  $M=6$ ;  $\delta=5$ ;  $i_1=0$ ;  $i_0=1$ ;  $f_1^2 = 0,2854$ ;  $f_2^2 = 0,2849$ ;  $x_0 = 1,993$ ;  $d_0 = 0,2477$ ;  $i_2 = 0,2415$ ;  $x_{20} = 0,73$ .

Перейдем к системе с неподвижной предметной плоскостью ( $i_0 = 0$ ) и перемещающимся первым компонентом ( $i_1 \neq 0$ ). Решая квадратное уравнение (49) (при условии  $i_0 = 0$ ), находим передаточное отношение  $i_1 = -1$ , определяющее систему наименьшей длины. По формулам (табл. 2) рассчитываем параметры системы наименьшей длины для данного случая:

$$f_1^2 = 1,467; \quad f_2^2 = 1,464; \quad d_0 = 1,273; \quad x_0 = 1,993; \quad x_{20} = 0,73.$$

## О некоторых свойствах панкратических систем

Анализ систем переменного увеличения с линейной связью между перемещениями компонентов позволил установить ряд интересных свойств таких систем, учитывая которые можно значительно сократить процессы расчета и анализа параметров СПУ при выборе исходной системы.

Из анализа формул (36) можно сделать следующие выводы.

1. Если в формулах (36) изменить знаки коэффициентов  $c_2^{(2)}$  и  $d_1^{(2)}$  на обратные, то знаки величин  $x_{20}'$ ,  $d_0$  и  $x_0$  также меняются на обратные при неизменной абсолютной величине; при этом величины  $f_1^2$  и  $f_2^2$  не меняются; перепад увеличений  $M_1$  при изменении параметра  $m$  в интервале  $-m \leq m \leq -m_1$  будет равен  $1/M$ .

2. Изменение знаков коэффициентов  $d_1^{(2)}$ ,  $d_0^{(2)}$  и передаточного отношения  $i_2$  приводит к изменению знаков величин  $x_{20}'$ ,  $d_0$  и  $f_1^2$  (т. е. линзовая система становится зеркально-линзовой с первым зеркальным компонентом, а зеркальная система [29] становится линзовой с первым линзовым компонентом и т. д.); перепад увеличений  $M_1 = M$  при  $m \leq m \leq m_2$ .

3. Изменение знаков коэффициентов  $c_2^{(2)}$ ,  $d_0^{(2)}$  и  $i_2$  приводит к изменению знаков величин  $x_0$  и  $f_1^2$ ; перепад увеличений  $M_1 = 1/M$  при изменении  $m$  в интервале  $-m_2 \leq m \leq -m_1$ .

СПУ, рассчитанная для заданных значений коэффициентов в выражении (36), служит основой для построения ряда новых пан-

Таблица 4

$c_2^{(2)}=0; c_1^{(2)}=-1; d_1^{(2)}=12,5; d_0^{(2)}=13,4; i_2=0,241; -1 \leq m \leq 1;$ $M=1/6; \delta=30$				
$x'_{20}$	$f_1^2$	$f_2^2$	$x_0$	$d_0$
0,73	0,2854	0,2849	1,993	0,2477
$c_2^{(2)}=0; c_1^{(2)}=-1; d_1^{(2)}=-12,5; d_0^{(2)}=13,4; i_2=0,241; -1 \leq m \leq 1;$ $M=6; \delta=5$				
-0,73	0,2854	0,2849	-1,993	-0,2477
$c_2^{(2)}=0; c_1^{(2)}=-1; d_1^{(2)}=12,5; d_0^{(2)}=-13,4; i_2=-0,241; -1 \leq m \leq 1;$ $M=1/6; \delta=-30$				
-0,73	-0,2854	0,2849	1,993	-0,2477
$c_2^{(2)}=0; c_1^{(2)}=-1; d_1^{(2)}=12,5; d_0^{(2)}=-13,4; i_2=-0,241; +1 \leq m \leq 1;$ $M=6; \delta=-5$				
0,73	-0,2854	0,2849	-1,993	0,2477

кратических систем. Максимальное смещение  $|\Delta_{\max}|$  плоскости изображения полученных СПУ имеет те же значения, что и исходная система. В табл. 4 приведены параметры двухкомпонентной системы для  $c_2^{(2)}=0; c_1^{(2)}=-1; M=1/6; \delta=30$  и параметры систем, полученных из этой системы в соответствии с описанными выше свойств; на рис. 17 приведены возможные схемы производных систем, полученных из основной.

### Зеркальные и зеркально-линзовые панкратические системы

Исследуем вопрос о возможности создания зеркальных и зеркально-линзовых двухкомпонентных панкратических систем с линейной связью между перемещениями компонентов, так как необхо-



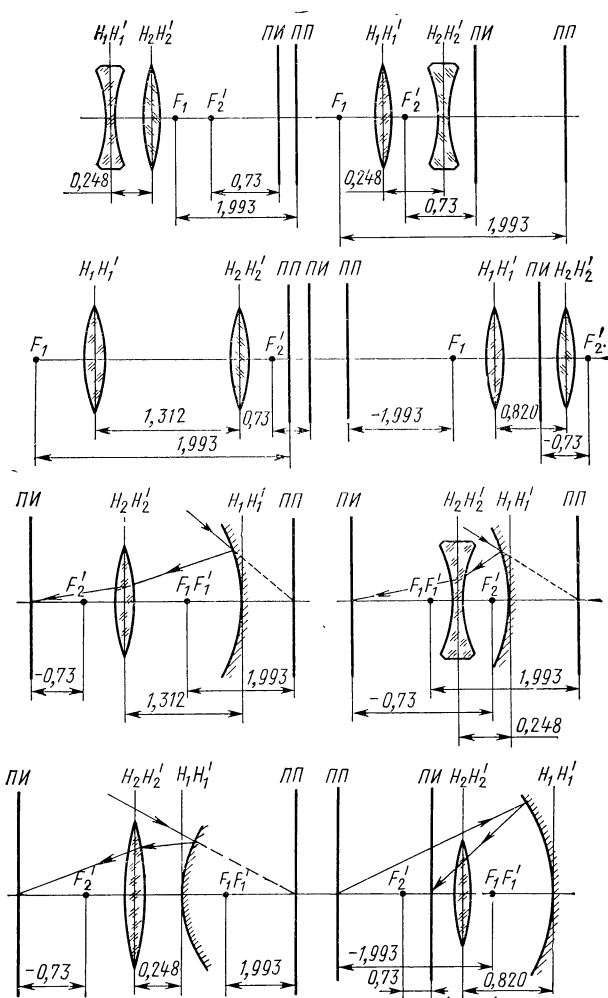


Рис. 17. Схемы оптических систем

димось в создании таких систем возникает достаточно часто (инфракрасная техника, длиннофокусные объективы и др.).

Простейшая кинематическая связь в СПУ имеет место при  $i_2=1$  (рис. 18), т. е. в том случае, когда предметная плоскость, ПП и второй компонент перемещаются как одно целое, а первый компонент неподвижен. Рассмотрим возможность построения таких

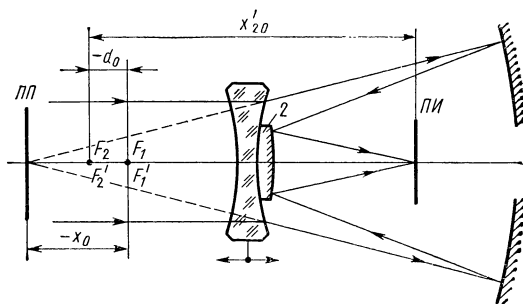


Рис. 18. Схема панкратического зеркального объектива при  $i_0=i_2=1$ ;  $i_1=0$

систем. Для расчета параметров оптической системы в этом случае пользуются зависимостью (36):

$$\begin{aligned} x'_{20} &= d_1^{(2)}; & f_2^2 &= (d_1^{(2)^2} - k); & x_0 &= \frac{d_1^{(2)}(k-1)}{d_1^{(2)^2} - k}; \\ d_0 &= \frac{d_1^{(2)}(d_1^{(2)^2} - 2k + 1)}{d_1^{(2)^2} - k}; & f_1^2 &= (k^2 - d_1^{(2)^2}) \frac{k-1}{(d_1^{(2)^2} - k)^2}. \end{aligned}$$

Как известно [2, 20, 21, 26], компонент выбирают зеркальным или линзовым в зависимости от знака величин  $f^2$  ( $f^2 > 0$  — линзовым,  $f^2 < 0$  — зеркальным). Определим на плоскости параметров  $M$  и  $\delta$  (рис. 19) области построения панкратических систем различных типов (линзовых, зеркальных и зеркально-линзовых). Из рис. 19 видно, что плоскость  $M$  разбилась на пять областей:  $I, II$  — области построения линзовых панкратических систем;  $III, V$  — зеркально-линзовых;  $IV$  — зеркальных.

Из анализа рис. 19 можно сделать следующие выводы.

1. Построение зеркальных систем возможно только при  $\delta < 2$  (область  $IV$ ).

2. Зеркально-линзовые системы с одним зеркальным компонентом возможны только при  $\delta < 0$  (область  $V$ ).

3. Меньшие значения смещений плоскости изображения можно получить для линзовых (области  $I, II$ ) и зеркально-линзовых систем по сравнению с зеркальными.

4. Для зеркально-линзовых систем, первый компонент которых является зеркальным, могут быть получены значительно меньшие смещения плоскости изображения, чем для систем со вторым зер-

кальным компонентом. В зеркальных системах смещение не может быть меньше  $\sqrt{3}/9$ , т. е.  $\Delta$  составляет примерно 20% перемещения подвижного компонента; в зеркально-линзовых системах с зеркальным вторым компонентом максимальное смещение плоскости изображения для перепадов  $M=2\div 3$  меньше в 9—4 раза, а для  $M>5$  — в 2 раза.

Следовательно, зеркальные системы с простейшей кинематической связью ( $i_2=1$ ) характеризуются большими смещениями плос-

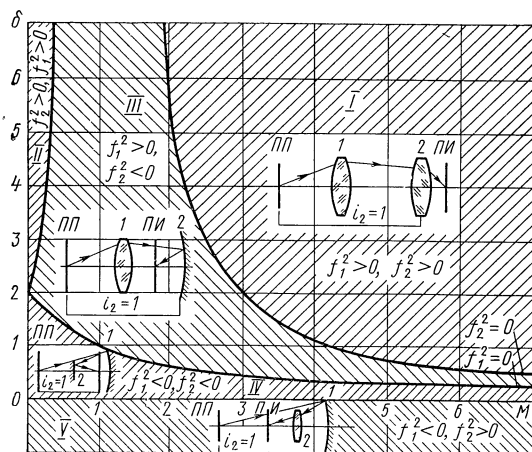


Рис. 19. Области построения зеркальных и зеркально-линзовых систем на плоскости  $M, \delta$  при  $i_2=i_0=1$

кости изображения, которые необходимо компенсировать. Такие системы можно использовать только при малых перепадах увеличений  $M<2$  в неотчетливых случаях (осветители) или для дискретного изменения увеличения (в трех точках имеется полная компенсация смещения плоскости изображения).

Проанализируем влияние передаточного отношения  $i_2$  на величину смещения плоскости изображения систем с  $i_2 \neq 1$  по сравнению со случаем  $i_2=1$ . При  $i_2 \neq 1$  параметры панкратической системы рассчитывают по формулам (36):

$$x'_{20} = d_1^{(2)} i_2^2; \quad f_2^2 = i_2^3 (d_1^{(2)^2} i_2 - k); \quad x_0 = \frac{d_1^{(2)} (ki_2 - 1)}{d_1^{(2)^2} i_2 - k};$$

$$d_0 = \frac{d_1^{(2)} i_2 (d_1^{(2)^2} i_2^2 - 2ki_2 + 1)}{d_1^{(2)^2} i_2 - k}; \quad f_1^2 = (k^2 - d_1^{(2)^2}) \frac{i_2 (ki_2 - 1)}{(d_1^{(2)^2} i_2 - k)^2}.$$

(50)

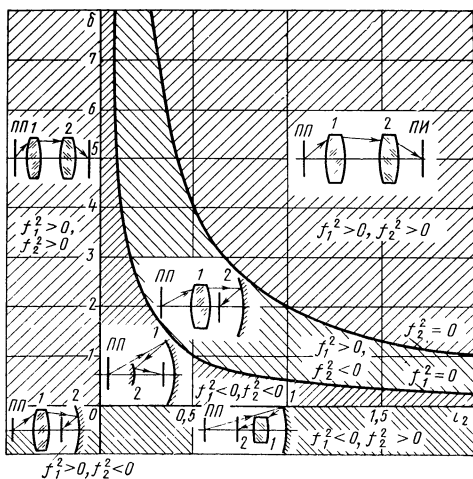


Рис. 20. Области построения панкратических систем различного типа на плоскости  $\delta, i_2$  для  $M=3$

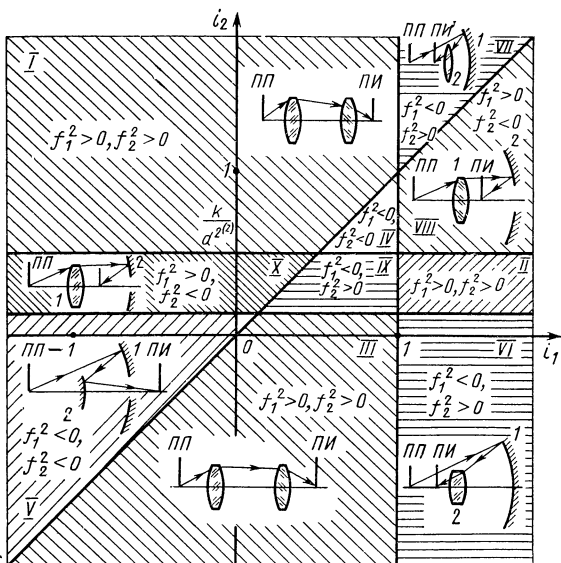


Рис. 21. Области построения панкратических систем различного типа на плоскости  $i_1, i_2$

Определим по зависимостям (50) области построения систем различных типов (рис. 20) на плоскости параметров  $\delta$  и  $i_2$ . Из рис. 20 следует, что, меняя величину передаточного отношения  $i_2$ , можно уменьшить смещение плоскости изображения для зеркальных систем в несколько раз (например, для  $M=3$  при  $i_2=0,5$   $\Delta$  уменьшается в 2 раза, а для  $i_2=0,1$  — в 10 раз); значительно уменьшается смещение плоскости изображения для зеркально-линзовых систем со вторым зеркальным компонентом, если  $i_2 < 0$ .

При расчете панкратических систем в общем случае, т. е. в случае, когда изменение увеличения осуществляется перемещением предметной плоскости и обоих компонентов, нужно учитывать, что тип оптической системы зависит также и от передаточного отношения  $i_1$  между перемещениями ПП и первого компонента. На рис. 21 представлены области линзовых, зеркальных и зеркально-линзовых панкратических систем на плоскости передаточных отношений  $i_1$  и  $i_2$ .

Графики на рис. 19—21 позволяют полностью проанализировать области создания панкратических систем различного типа (линзовых, зеркальных и зеркально-линзовых) в зависимости от передаточных отношений  $i_1$ ,  $i_2$ , перепада увеличений  $M$  и смещения плоскости изображения  $\Delta$ , характеризуемого величиной  $\delta$ . В зависимости от оптической схемы панкратической системы анализ соответствующих областей (рис. 19—21) позволяет выбрать параметры соответствующей панкратической системы  $x_0$ ,  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $d_0$ ,  $x_{20}$ , передаточные отношения  $i_0$ ,  $i_1$  и  $i_2$ , обеспечивающие заданный перепад увеличений  $M$ , и максимально допустимое смещение ПИ  $\Delta_{\max}$ .

## Расчет панкратических систем с большим перепадом увеличений

Исследуем возможности создания панкратических систем с большим перепадом увеличений [29]. Под большим перепадом увеличений  $M$  условимся понимать величины  $M > 6$  для двухкомпонентных систем и  $M > 10$  для трехкомпонентных, так как в практически созданных системах, в которых используются двухкомпонентные СПУ, перепад увеличений не превышает 6, а в системах с трехкомпонентными СПУ — не превышает 10 [3].

Первый путь, по которому можно направить исследование возможности создания СПУ с большим перепадом увеличений, заключается в использовании предлагаемой методики расчета систем переменного увеличения с линейной связью между перемещениями компонентов для  $M > 6$  и  $M > 10$  (соответственно для двух- и трехкомпонентных систем) [16]. Рассмотрим двухкомпонентные СПУ. Анализ результатов расчета параметров двухкомпонентных панкратических систем [28] позволил сделать вывод: максимальные смещения  $\Delta_{\max}$  плоскости изображения в исследованных системах имеют следующие значения: при  $M=3$   $\Delta_{\max}=0,003$ ; при  $M=6$   $\Delta_{\max}=0,005$ ; при  $M=10$   $\Delta_{\max}=0,011$ ; при  $M=12$   $\Delta_{\max}=0,024$ ;  $M=15$  —  $\Delta_{\max}=0,018$ .

Следует отметить, что наилучшие результаты при расчете (особенно для  $M > 4$ ) получаются при  $i_2 \leq 0,2$ . При передаточных отношениях  $i_0=i_2=1$ ;  $i_1=0$  и  $i_0=0$ ;  $i_2=1$ ;  $i_1=-1$  [10, 42, 51] ма-

лые смещения ПИ можно получить только для  $M \leq 3$ . При переда точных отношениях  $i_2 < 0,2$  диапазон изменения увеличений  $M$  может быть расширен до  $M=10 \div 15$  при смещениях ПИ  $\Delta_{\max}$  таких же, как в трехкомпонентных СПУ с  $i_0=0=i_2$ ;  $i_1=i_3=1$  [33]. Однако с увеличением  $M$  оптические силы компонентов увеличиваются, что затрудняет получение большого поля зрения системы, ее коррекцию и т. д.

Второй путь повышения перепада увеличений  $M$  состоит в использовании нелинейного перемещения одного из компонентов по заданному закону (например,  $i_2=i_{20}m$  или  $i_1=i_{10}m$  и т. д.). Как известно [23], перемещение одного из компонентов или предметной плоскости по заданному закону позволяет уменьшить смещение ПИ в несколько раз (5—10), т. е. получить смещения ПИ, по величине равные смещениям ПИ в трехкомпонентных системах с линейной связью между перемещениями компонентов.

Третий путь повышения перепада увеличений  $M$  заключается в расширении диапазона перемещения компонентов некоторой выбранной системы.

Суть предлагаемой методики состоит в следующем:

1) выбираем из табл. 7 систему, имеющую удовлетворительные параметры, перепад увеличений  $M$  которой требуется расширить;  
2) рассчитываем диапазон изменений  $m$ , на котором обеспечивается заданный перепад увеличений  $M$ ;

3) рассчитываем закон изменения  $\Delta=\Delta(m)$  и определяем  $\Delta_{\max}$  для новой системы;

4) если  $\Delta_{\max}$  меньше либо равно допустимому значению смещения ПИ, определяемому назначением системы, то в новой системе закон перемещения компонентов остается линейным;

5) если  $\Delta_{\max}$  превышает допустимое значение смещения ПИ, то определяем закон перемещения одного из компонентов (из условия  $\Delta=0$ ), обеспечивающий неподвижность плоскости изображения на всем диапазоне изменения  $m$  или на отрезке, где смещение ПИ превышает допустимое значение.

Проиллюстрируем сказанное двумя примерами. Выбираем систему с неподвижным первым компонентом и перемещающейся ПП со следующими параметрами:  $M=1/12$ ;  $i_2=0,1$ ;  $\delta=60$ ;  $x'_{20}=0,275$ ;  $f_2^2=0,043125$ ;  $f_1^2=0,3629$ ;  $x_0=1,43478$ ;  $d_0=0,13152$ .

Сделаем неподвижной ПП, а первый компонент перемещающимся с  $i_1=-1$ . Тогда параметры новой системы (см. табл. 2) будут иметь следующие значения:  $i_1=-1$ ;  $i_2=0,1$ ;  $x'_{20}=0,275$ ;  $f_2^2=0,474$ ;  $f_1^2=0,40$ ;  $x_0=1,43478$ ;  $d_0=1,444$ . Оптические схемы рас-

Т а б л и ц а 5

$m$	-1,375	-1,1	-1,05	-1	-0,8	0	+0,6	+1	+2
$\Delta$	0,34	0,053	0,0228	0	-0,0417	0	0,00903	0	-0,051
$\delta$	3,6	4,35	4,7	5	6,9	22,5	42,60	60	117,5

считанной системы представлены на рис. 22, а. Значения  $\delta = \delta(m)$  и  $\Delta = \Delta(m)$  приведены в табл. 5.

Анализ результатов расчета показывает, что при  $-1,05 \leq m \leq 1,8$  выбранные системы имеют перепад увеличений  $M=25$  и  $\Delta_{\max} = 0,0369$ , как и в исходной системе. Таким образом, данная система может обеспечить перепад увеличений до  $M=25$ .

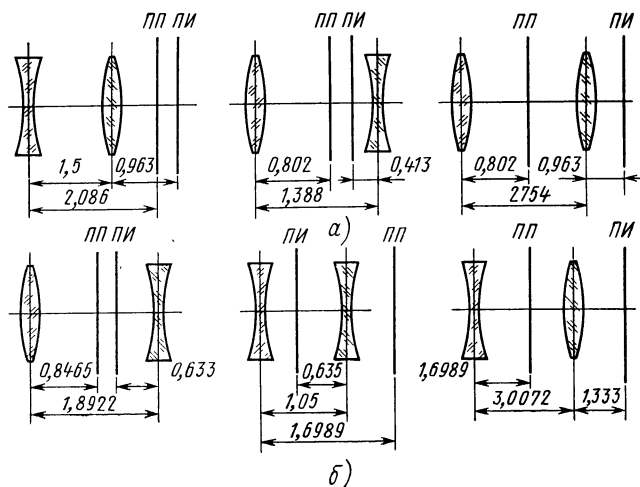


Рис. 22. Схемы панкратических систем

Рассмотрим второй пример. Выбираем систему со следующими параметрами:  $M=15$ ;  $i_2=0,1$ ;  $i_1=-1$ ;  $\delta=75$ ;  $x'_{20}=0,35$ ;  $f_2^2=0,9675$ ;  $f_1^2=0,1817$ ;  $x_0=1,2727$ ;  $d_0=2,4497$ . Плоскость предметов неподвижна, первый компонент перемещается с  $i_1=-1$ . Оптическая схема этой системы представлена на рис. 22. В табл. 6 приведены значения  $\Delta(m)$  и  $\delta(m)$ .

Таблица 6

$m$	-1,215	-1	-0,8	0	+1,0	+1,8	+2	+3
$\Delta$	0,257	0	-0,0343	0	0	-0,0321	-0,0428	-0,107
$\delta$	2,25	5	8,4	30	75	125,4	140	225

Анализ табл. 6 показывает, что при  $-1 \leq m \leq 2$  перепад увеличений  $M=28$  при  $\Delta_{\max}=0,05$ ;  $M \approx 45$  при  $\Delta_{\max} \leq 0,1$ ;  $-1 \leq m \leq 3$ ; при  $3 \geq m \geq -1,215$  перепад  $M=100$  при  $\Delta_{\max} \leq 0,257$ . Таким обра-

зом, в данной системе можно расширить перепад увеличений до 45—100. Однако в этом случае требуется компенсация смещения ПИ за счет нелинейного перемещения одного из компонентов по закону  $i_2 m = i_2(m) m$  или за счет перемещения вводного дополнительного третьего компонента по нелинейному закону.

## Расчет параметров панкратических систем для различных величин перепадов и перемещения плоскости изображения

Параметры систем рассчитывались для различных величин перепадов  $M$  и  $\delta$ , определяющих перемещение плоскости изображения для возможных значений передаточных отношений  $i_1$  и  $i_2$ . За исходную систему при расчете принималась система переменного увеличения с неподвижным первым компонентом. Параметры производных систем могут быть получены из параметров основной, как это показано выше.

Параметры рассчитанных систем сведены в табл. 7. Все параметры даны в относительных величинах. За единицу принято значение величины  $m$  перемещения предмета из нулевого положения в крайнее.

Приведем пример расчета системы переменного увеличения при  $c_2^2 = 0$ ;  $c_1^{(2)} = -1$ ;  $M = 1/6$ ;  $\delta = 30$ . Соответствующая система наименьшей длины имеет следующие параметры:

$$i_2 = 0,2415; \quad x'_{20} = 0,73; \quad f_1^2 = 0,2854; \quad f_2^2 = 0,2849; \\ x_0 = 1,993; \quad d_0 = 0,2477; \quad i_1 = 0.$$

Для полученных данных можно построить три системы (рис. 23). В этих системах первый компонент неподвижен, а перемещаются предметная плоскость и второй компонент с передаточным отношением  $i_2 = 0,2415$ . Система переменного увеличения дает одинаковые перепад увеличения и перемещение плоскости изображения независимо от того, из каких компонентов она построена — из положительных, отрицательных или тех и других.

В зависимости от знаков  $f_1$  и  $f_2$  система может давать прямое или перевернутое изображение согласно формуле (27).

Все полученные системы (см. рис. 25,  $a—в$ ) идентичны с точки зрения увеличения, фокусных расстояний и перемещений плоскости изображения; все они получаются построением из одной и той же рассчитанной системы.

Система, представленная на рис. 24, имеет коэффициент  $d_1^{(2)} < 0$ . В этом случае параметры  $x'_{20}$ ,  $x_0$ ,  $d_0$  меняют знак на обратный по сравнению с предыдущей системой, а  $f_1^2$  и  $f_2^2$  остаются теми же.

Таким образом, сравнение полученных систем можно вести либо по габаритным размерам, либо по элементам оптической системы с точки зрения получения наибольшего поля зрения системы или светосилы.

Каждая из представленных на рис. 23, 24 систем может послужить основой для получения новых систем переменного увеличения. Покажем это на примере.



Таблица 7

$i_2$	$x'_{20}$	$f_2$	$x_0$	$d_0$	$f_1$	$M$
$\delta=5; c_2^{(2)}=0; c_1^{(2)}=-1; i_0=1; i_1=0; -1 \leq m \leq 1$						
-0,1 -0,15 -0,2 0,2 0,5 0,3 -0,5 1,0 -1,0	-0,05 -0,1125 -0,2 -1,25 -0,45 -1,25 -5,00	0,0125 0,046406 0,12 -0,04 0,3125 -0,0675 2,8125 15,00 35,00	-0,8 -0,90909 -1,00 -1,00 -8,000 4 -1,333 -3,000 -1,5741	-0,13 -0,2488 -0,4 -0,4 -2,75 -1,65 -1,9165 -2,00 -6,5714	0,096 0,1487 0,2 0,6 24,00 7,2 0,444 3,000 0,6734	3
-0,1 -0,15 -0,2 0,5 0,4 -0,5 1,0 -1,0	-0,075 -0,1687 -0,3 -1,875 -1,2 -1,875 -7,5	0,181 0,0706 0,19 1,9531 0,64 5,0781 43,75 68,75	-0,9310 -1,0298 -1,1052 -2,52 -3 -1,3382 -1,9942 -1,4727	-0,1681 -0,3232 -0,5210 -0,615 0 -2,5441 -5,5057 -8,9727	0,0684 0,0983 0,1240 1,0752 1,6 0,2196 0,6008 0,2856	
-0,1 -0,15 0,2 -0,2 0,5 -0,5 1,00 -1,00	-0,1 -0,225 -0,4 2,5 -10,00	0,025 0,1012 0,04 0,28 4,375 8,125 85,00 115,00	-1,00 -0,0833 -4,00 -1,143 -1,857 -1,3076 -1,6470 -1,3913	-0,2 -0,3874 -0,4 -2,686 -1,5715 -3,1538 -8,3529 -11,391	0,05 0,0677 2,00 0,0816 0,3316 0,1257 0,2422 0,1512	
-0,1 0,15 -0,15 0,2 0,2415 -0,2 0,5 -0,5 1,0 -1,0	-0,125 -0,2812 -0,5 -0,73 -0,5 -3,125 -12,5	0,0331 0,0200 0,1281 0,11 0,2849 0,39 7,5781 11,9531 138,75 173,75	-1,0377 -3,4210 -1,1068 -2,2727 -1,993 -1,1538 -1,5979 -1,2745 -1,4864 -1,3309	-1,1627 -0,2319 -0,4472 -0,0454 -0,2477 -0,7307 -2,3260 -13,137 -11,013 -13,830	0,0375 0,0371 0,0486 0,3966 0,2854 0,0568 0,1581 0,0799 0,1285 0,0919	
0,1 -0,1 0,15 -0,15 0,2 -0,2 0,5 -0,5 1,0 -1,0	-0,15 -0,3375 -0,6 -3,75 -15,00	0,0025 0,0425 0,0464 0,1814 0,2 0,52 11,5625 16,5625 205,00 245,00	-6,000 -1,0588 -2,1818 -1,1162 -1,8 -1,1538 -1,4594 -1,2452 -1,3902 -1,2857	0,45 -0,2558 -0,0102 -0,5049 -0,24 -0,8307 -3,0202 -4,3726 -13,6097 -16,2857	2,8 0,0290 0,2776 0,0363 0,168 0,0414 0,0920 0,0548 0,0791 0,0612	

Продолжение табл. 7

$i_2$	$x_{20}$	$l_2^2$	$x_0$	$d_0$	$f_1^2$	$M$
$\delta=5; c_2^{(2)}=0; c_1^{(2)}=-1; i_0=1; i_1=0; -1 \leq m \leq 1$						
0,1 -0,1 0,15 -0,15 0,2 -0,2 0,5 -0,5 1,0 -1,0	-0,175 -0,3937 -0,7 4,375 -17,5 17,5	0,0081 0,0531 0,0791 0,2209 0,31 0,67 16,3281 21,9531 283,75 328,75	-2,6923 -1,0705 -1,7733 -1,1187 -1,5806 -1,1224 -1,3732 -1,2206 -1,3259 -1,2509	0,0942 -0,2820 -0,1277 -0,5615 -0,3838 -0,9244 -3,6883 -4,9853 -16,1740 -18,7509	0,3786 0,0230 0,1297 0,0280 0,0932 0,0299 0,0600 0,0397 0,0534 0,0434	8
0,1 -0,1 0,15 -0,15 0,2 -0,2 0,5 -0,5 1,0 -1,0	-0,2 -0,45 -0,8 -5,00 -20,00	0,015 0,065 0,1181 0,2868 0,44 0,840 21,875 28,125 375,0 425,0	-2,00 -1,0769 -1,5714 -1,1176 -1,4545 -1,1428 -1,31428 -1,2 -1,28 -1,2235	0 -0,3076 -0,2142 -0,6176 -0,5090 -1,0285 -4,3428 -5,6 -18,72 -21,2235	0,15 0,0186 0,0757 0,0221 0,0595 0,0244 0,0422 0,03 0,0384 0,0323	9
0,1 -0,1 0,15 -0,15 0,2 -0,2 0,5 -0,5 1,0 -1,0	-0,225 -0,5062 -0,9 -5,625 -22,5	0,0231 0,0781 0,1634 0,3491 0,67 1,03 28,2031 35,0781 478,75 533,75	-1,7027 -1,08 -1,4516 -1,1148 -1,2089 -1,1359 -1,2714 -1,1826 -1,2454 -1,2014	-0,0547 -0,333 -0,2885 -0,6734 -0,6582 -0,1271 -4,9892 -6,2163 -21,254 -23,701	0,0818 0,0153 0,0499 0,0179 0,0320 0,0196 0,0313 0,0234 0,0289 0,025	10
0,1 -0,1 1 -1	-0,25 -25	0,0325 0,0925 595 655	-1,5384 -1,0811 -1,2185 -1,1832	-0,0961 -0,3581 -23,7815 -26,1832	0,05207 0,01285 0,02252 0,01987	11
0,1 -0,1 1 -1	-0,275 -27,5	0,0431 0,1081 723,75 788,75	-1,4347 -1,0809 -1,1969 -1,1680	-0,1315 -0,3831 -26,3031 -28,6680	0,03629 0,01091 0,01804 0,01615	12
0,1 -0,1 1 -1	-0,3 -30	0,125 0,055 865 935	-1,08 -1,3636 -1,1792 -1,1551	-0,408 -0,1636 -28,8208 -31,1551	0,00936 0,02685 0,01476 0,01338	13

Продолжение табл. 7

$i_2$	$x'_{20}$	$f_2^2$	$x_0$	$d_0$	$f_1^2$	$M$
0,1 -0,1 1 -1	-0,325 -32,5	0,0681 0,1431 1018,75 1093,75	-1,3119 -1,0786 -1,1644 -1,144	-0,1938 -0,4328 -31,3355 -33,644	0,02074 0,00811 0,01231 0,01126	14
0,1 -0,1 1 -1	-0,35 -35	0,0825 0,1625 1185 1265	-1,2727 -1,0769 -1,1519 -1,1343	-0,2227 -0,4576 -33,8481 -36,1344	0,01652 0,0071 0,01041 0,00961	15
$\delta=10; c_2^{(2)}=0; c_1^{(2)}=-1; i_0=1; i_1=0; -1 \leq m \leq 1$						
-0,1 -0,15 -0,2 0,25 0,4 0,5 -0,5 1,0 -1,0	-0,1 -0,225 -0,4 -0,625 -1,6 -2,5 -10,00	0,03 0,1181 0,320 0,0781 1,280 3,75 8,75 80,00 120,00	-1,0 -1,143 -1,25 -8,00 -3,5 -3,00 -1,5714 -2,375 -1,75	-0,2 -0,3964 -0,65 -1,375 -0,2 -1,00 -3,2857 -7,625 -11,75	0,1 0,1469 0,1875 12,000 2,1 1,5 0,3367 0,8906 0,4375	3
-0,1 0,15 -0,15 0,2 -0,2 0,5 -0,5 1,0 -1,0	-0,15 -0,3375 -0,6 -3,75 -15,00	0,0475 0,0295 0,1982 0,16 0,560 10,9375 17,1875 200,00 250,00	-0,7894 -4,7 -1,2127 -3,000 -1,2857 -1,9714 -4,4727 -1,8 -1,56	-0,2289 0,3675 -0,5194 0 -0,8571 -2,7642 -4,4863 -13,2 -16,56	0,0443 2,1552 0,0825 0,8 0,0979 0,2965 0,1428 0,24 0,1664	4
0,1 -0,1 0,15 -0,15 0,2 -0,2 0,5 -0,5 1,0 -1,0	-0,2 -0,45 -0,8 -5,00 -20,00	0,01 0,07 0,1012 0,3037 0,4 0,88 21,25 28,75 37,00 430	-4,00 -1,1428 -2,333 -1,222 -2,00 -1,2727 -1,6470 -1,3913 -1,5675 -1,4411	0,2 -0,3142 -0,100 -0,6333 -0,4 -1,0545 -4,1764 -5,6956 -18,4324 -21,4418	1,000 0,4081 0,2916 50,9259 0,2 0,0578 0,1211 0,0756 0,1059 0,0838	5
0,1 -0,1 0,15 -0,15 0,2 -0,2	-0,25 -0,5625 -1,0	0,0275 0,0975 0,1982 0,4345 0,72 1,28	-2,27 -1,1538 -1,8085 -1,2135 -1,666 -1,25	-0,023 -0,3653 -0,2912 -0,7445 -0,6668 -1,25	0,1983 0,0284 0,1108 0,0339 0,0889 0,0375	6

Продолжение табл. 7

$i_2$	$x'_{20}$	$f_2^2$	$x_0$	$d_0$	$f_1^2$	$M$
$\delta=10; c_2^{(2)}=0; c_1^{(2)}=-1; i_0=1; i_1=0; -1 \leq m \leq -1$						
0,5 -0,5 1,0 -1,0	-6,25 -25,00	34,6875 43,4375 590 660	-1,4864 -1,3309 -1,4406 -1,3636	-5,5067 -6,9154 -23,5593 -26,3636	0,0642 0,0459 0,0586 0,0495	6
0,1 -0,1 0,15 -0,15 0,2 -0,2 0,5 -0,5 1,0 -1,0	-0,3 -0,675 -1,2 -7,5 -30,99	0,05 0,13 0,3206 0,5906 1,120 1,760 51,25 61,25 860 940	-1,8 -1,1538 -1,5789 -1,2 -1,5 -1,2272 -1,3902 -1,2857 -1,3604 -1,3085	-0,12 -0,4153 -0,4381 -0,855 -0,9 -1,4454 -6,8048 -8,1428 -28,6395 -31,3085	0,084 0,0207 0,0581 0,024 0,05 0,0260 0,3955 0,3061 0,0369 0,0324	7
0,1 -0,1 0,15 -0,15 0,2 -0,2 0,5 -0,5 1,0 -1,0	-0,35 -0,7875 -1,4 -8,75 -35	0,0775 0,1675 0,4682 0,7720 1,6 2,32 70,9375 82,1875 1180 1270	-1,5806 -1,1492 -1,4504 -1,1857 -1,4 -1,2068 -1,3259 -1,2509 -1,3050 -1,2677	-0,1919 -0,4649 -0,5699 -0,9653 -1,12 -1,6413 -8,0870 -9,3754 -33,6949 -36,2677	0,0466 0,0156 0,0358 0,0177 0,032 0,0190 0,0267 0,0217 0,0252 0,0228	8
0,1 -0,1 0,15 -0,15 0,2 -0,2 0,5 -0,5 1,0 -1,0	-0,4 -0,9 -1,6 -10,00 -40,00	0,11 0,21 0,6412 0,9787 2,160 2,960 93,75 106,25 1550 1650	-1,4545 -1,1428 -1,3684 -1,1724 -1,333 -1,1891 -1,128 -1,2235 -1,2645 -1,2363	-0,2545 -0,5142 -0,6947 -1,0758 -1,3334 -1,8378 -9,436 -10,6117 -38,7354 -41,2363	0,0297 0,0122 0,0243 0,0136 0,0222 0,0144 0,0192 0,0161 0,0183 0,0168	9
0,1 -0,1 0,15 -0,15 0,2 -0,2 0,5 -0,5 1,0 -1,0	-0,45 -1,0125 -1,8 -11,25 -45	0,1475 0,2575 0,8395 1,2107 2,8 3,680 119,6875 133,4375 1970 2080	-1,3722 -1,1359 -1,3115 -1,1602 -1,2857 -1,1739 -1,2454 -1,2014 -1,2335 -1,2115	-0,3127 -0,5635 -0,8157 -1,1865 -1,5428 -2,0347 -10,5272 -11,8507 -43,7664 -46,2115	0,0206 0,0098 0,0175 0,0107 0,0163 0,0113 0,0144 0,0125 0,0139 0,0129	10

Системы, представленные на рис. 23, относятся к частному случаю «а» ( $i_1=0$ ). Система с неподвижной предметной плоскостью и перемещающимися первым и вторым компонентами (случай «б» для  $i_1=-1$ ), получающаяся из случая «а», имеет следующие параметры:  $i_2=0,2415$ ;  $x'_{20}=0,73$ ;  $i_1=-1$ ;  $f_1^2=1,467$ ;  $f_2^2=1,464$ ;  $d_0=$

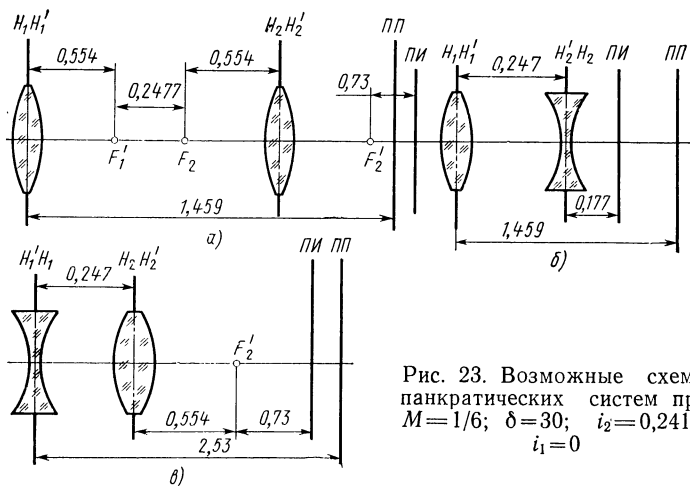


Рис. 23. Возможные схемы панкратических систем при  $M=1/6$ ;  $\delta=30$ ;  $i_2=0,2415$ ;  $i_1=0$

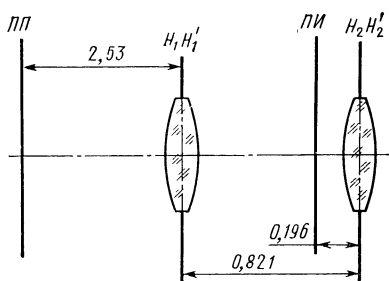


Рис. 24. Схема панкратической системы для  $M=6$ ;  $\delta=-5$

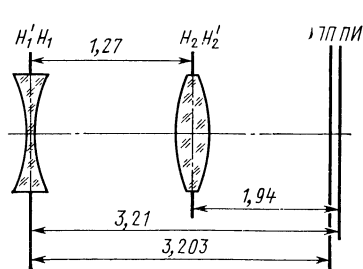


Рис. 25. Схема панкратической системы при  $M=1/6$ ;  $\delta=30$ ;  $i_2=0,2415$ ;  $i_1=-1$

$=1,273$ ;  $x_0=1,993$ . Эта система представлена на рис. 25. Она практически также является системой переменного увеличения наименьшей длины для данного случая. Габаритные размеры полученной системы больше, чем основной, но зато оптические силы ее компонентов в 2,26 раза меньше, что делает ее более практически удобной. Если в полученной системе использовать компоненты с теми же фокусными расстояниями, что и в исходной, то эта система пере-

менного увеличения будет меньше исходной по габаритным размерам и перемещение плоскости изображения в ней будет в 2,26 раз меньшим.

Уменьшение перемещения плоскости изображения может быть достигнуто следующим образом: выбираем значения  $i_1 < -1$  и уменьшаем параметры получаемой системы в  $\sqrt{\frac{i_2 - i_1}{i_2}}$  раз, в результате получаем систему с фокусным расстоянием  $f_2$ , как и у

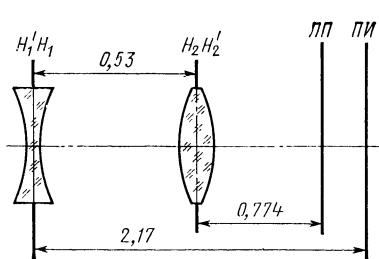


Рис. 26. Схема панкратической системы при  $M=1/6$ ;  $\delta=30$ ;  $i_0=0$ ;  $i_2=0,2415$ ;  $i_1=-2,415$

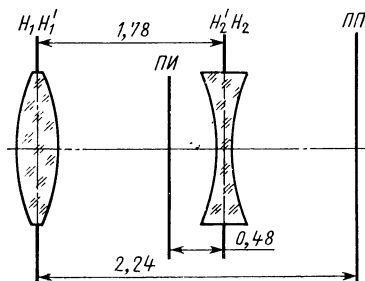


Рис. 27. Схема панкратической системы при  $M=1/6$ ;  $\delta=30$ ;  $i_0=1$ ;  $i_1=-1$ ;  $i_2=0,2415$

исходной, но перемещение плоскости изображения у новой системы в  $\sqrt{\frac{i_3 - i_1}{i_2}}$  раз меньше. Величина  $d_0$  полученной системы увеличивается в  $\sqrt{\frac{i_2 - i_1}{i_2}}$  раз,  $x_0$  — в  $\frac{-i_1 \sqrt{i_2}}{\sqrt{i_2 - i_1}}$  раз,  $f_1$  — в  $\sqrt{i_1}$  раз,

и передаточное отношение  $i_2' = i_2/i_1$  между перемещениями первого и второго компонентов уменьшается. Таким образом, за счет увеличения  $d$  системы и уменьшения передаточного отношения между перемещениями первого и второго компонентов может быть достигнуто значительное уменьшение перемещения плоскости изображения. Например, пусть  $i_1 = -2,415$ , тогда  $\sqrt{\frac{i_2 - i_1}{i_2}} = \sqrt{11} = 3,32$ ,

и передаточное отношение  $i_2' = 0,1$ . В этой системе перемещение плоскости изображения в 3,32 раз меньше, чем в исходной системе, но и увеличение  $\beta_{\max} = \max|\beta|$  в  $\sqrt{-i_1}$  раз меньше;  $m = \pm 0,696$ .

При  $i_1 = -2,415$  возможны три системы, одна из которых представлена на рис. 26. В этой системе перепад увеличений меньше, чем в исходной, так как  $m = \pm 0,696$ , а расстояние между главными плоскостями  $H_1'$  и  $H_2$  составляет 0,53. Другие две системы лишены этого недостатка.

Аналогичным образом можно построить и систему, в которой перемещаются предметная плоскость, первый и второй компоненты.

Пусть  $i_1 = -1$ , тогда  $x'_{20} = 0,73$ ;  $f_2^2 = 1,464$ ;  $f_1^2 = 2,934$ ;  $x_0 = 3,986$ ;  $d_0 = 1,273$ .

Полученная система представлена на рис. 27. В этой системе  $\beta_{\max} = \max|\beta|$  в  $\sqrt{2}$  раза меньше, чем в исходной; величины  $x_0$  и  $f_1^2$  будут больше, чем в системах для случаев «а» и «б».

#### 4. ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ

Рассмотрим оптическую схему трехкомпонентной панкратической системы (рис. 28), изменение увеличения которой осуществляется перемещением предметной плоскости и всех трех компонентов.

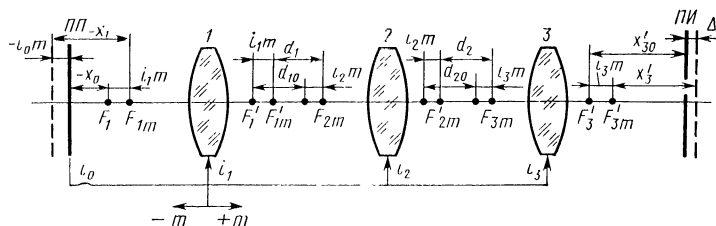


Рис. 28. Схема трехкомпонентной панкратической системы

Найдем выражение величины смещения плоскости изображения через параметры системы и перемещения компонентов. Согласно рис. 28 напомним

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 - jm; & d_1 &= d_{10} - \xi m; \\ d_2 &= d_{20} + \varepsilon m; & \Delta &= x'_3 - x'_{30} + i_3 m, \end{aligned}$$

где

$$j = i_1 - i_0; \quad \xi = i_1 - i_2; \quad \varepsilon = i_3 - i_2.$$

Используя формулу Ньютона, находим величины  $x'_3$  и  $x'_{30}$ :

$$\begin{aligned} x'_1 &= -\frac{f_1^2}{x_1}; & x_2 &= x'_1 - d_1; & x'_2 &= -\frac{f_2^2}{x'_1 - d_1}; \\ x_3 &= x'_2 - d_2; & x'_3 &= -\frac{f_3^2}{\frac{f_2^2}{\frac{f_1^2}{x_0 - jm} + (d_{10} - \xi m)} - (d_{20} + \varepsilon m)}; \end{aligned} \quad (51)$$

$$x'_{30} = - \frac{f_3^2}{\frac{f_2^2}{\frac{f_1^2}{x_0} + d_0} - d_{20}} .$$

После громоздких, но несложных преобразований [17] выражение для смещения плоскости изображения  $\Delta$  можно представить в виде

$$\Delta = \frac{m^4 + c_3^{(3)} m^3 + c_2^{(3)} m + c_1^{(3)} m}{\frac{m^3}{i_3} + d_2^{(3)} m^2 + d_1^{(3)} m + d_0^{(3)}} , \quad (52)$$

где

$$\begin{aligned} c_3^{(3)} &= \frac{1}{i_3} [d_2^{(3)} i_3^{(2)} - x'_{30}] ; \\ c_2^{(3)} &= \frac{1}{\varepsilon i_3} [f_3^2 + \varepsilon i_3^2 d_1^{(3)} - \varepsilon i_3 x'_{30} d_2^{(3)}] ; \\ c_1^{(3)} &= \frac{1}{\varepsilon \xi j i_3} [i_3^2 \varepsilon \xi j d_0^{(3)} - \varepsilon \xi j i_3 x'_{30} d_1^{(3)} - f_3^2 (\xi x_0 + j d_{10})] ; \\ d_2^{(3)} &= \frac{1}{\varepsilon \xi j i_3} [\xi j d_{20} - \varepsilon (\xi x_0 + j d_{10})] ; \\ d_1^{(3)} &= \frac{1}{\varepsilon \xi j i_3} [\varepsilon f_1^2 + \varepsilon d_{10} x_0 + j f_2^2 - d_{20} (\xi x_0 + j d_{10})] ; \\ d_0^{(3)} &= \frac{1}{\varepsilon \xi j i_3} [d_{20} (f_1^2 + x_0 d_{10}) - x_0 f_2^2] . \end{aligned} \quad (53)$$

Выразим параметры СПУ  $x_0$ ,  $f_1^2$ ,  $d_{10}$ ,  $f_2^2$ ,  $d_{20}$ ,  $x'_{30}$  и  $f_3^2$  через коэффициенты  $c_3^{(3)}$ ,  $c_2^{(3)}$ ,  $c_1^{(3)}$ ,  $d_2^{(3)}$ ,  $d_1^{(3)}$  и  $d_0^{(3)}$  и передаточные отношения  $i_0$ ,  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ .

Из формул (53) получаем

$$\begin{aligned} x'_{30} &= d_2^{(3)} i_3^2 - c_3^{(3)} i_3 ; \\ f_3^2 &= \varepsilon i_3 [c_2^{(3)} - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)} (d_2^{(3)} i_3^2 - c_3^{(3)} i_3)] ; \\ \xi x_0 + j d_{10} &= \frac{\xi j [d_0^{(3)} i_3 - d_1^{(3)} i_3 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)}) - c_1^{(3)}]}{c_2^{(3)} - d_2^{(3)} i_3 + d_2^{(3)} i_3 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)})} ; \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
d_{20} &= d_2^{(3)} \varepsilon i_3 + \varepsilon \frac{d_0^{(3)} i_3 - d_1^{(3)} i_3 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)}) - c_1^{(3)}}{c_2^{(3)} - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)} i_3 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)})}; \\
f_2^2 &= \varepsilon \xi i_3 d_1^{(3)} + d_{20} \xi \frac{d_0^{(3)} i_3 - d_1^{(3)} i_3 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)}) - c_1^{(3)}}{c_2^{(3)} - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)} i_3 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)})} - \\
&\quad - \frac{d_0^{(3)} i_3 \xi \varepsilon (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)})}{c_2^{(3)} - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)} i_3 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)})}; \\
x_0 &= - \frac{d_0^{(3)} \varepsilon \xi j i_3}{f_2^2} \left[ 1 - \frac{d_{20} x'_{30}}{f_3^2} \right]; \\
d_{10} &= \frac{\xi [d_0^{(3)} i_3 - d_1^{(3)} i_3 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)}) - c_1^{(3)}]}{c_2^{(3)} - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)} i_3 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)})} + \\
&\quad + \frac{d_0^{(3)} \varepsilon \xi^2 i_3}{f_2^2} \left[ 1 - \frac{d_{20} x'_{30}}{f_3^2} \right]; \\
f_1^2 &= \frac{d_0^{(3)} (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)}) i_3 \xi j}{c_2^{(3)} - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)} i_3 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)})} - x_0 d_{10}. \quad (54)
\end{aligned}$$

Выведем формулу для увеличения системы  $\beta$ . Как известно,

$$\beta = \left( -\frac{f_1}{x_1} \right) \left( -\frac{f_2}{x_2} \right) \left( -\frac{f_3}{x_3} \right) = -\frac{f_1 f_2 f_3}{x_1 x_2 x_3}.$$

Учитывая (51), находим выражение

$$x_1 x_2 x_3 = \varepsilon \xi i_3 j \left[ \frac{m^3}{i_3} + d_2^{(3)} m^2 + d_1^{(3)} m + d_0^{(3)} \right].$$

Следовательно, увеличение системы

$$\beta = - \frac{f_1 f_2 f_3}{i_3 \varepsilon \xi j \left[ \frac{m^3}{i_3} + d_2^{(3)} m^2 + d_1^{(3)} m + d_0^{(3)} \right]}. \quad (55)$$

Запишем условия перепада увеличений при изменении переменного параметра  $m$  от величины  $m_1$  до величины  $m_2$ . Из (55) условия перепада увеличения можно записать так:

$$\begin{cases} \frac{m_2^3}{i_3} + d_2^{(3)} m_2^2 + d_1^{(3)} m_2 + d_0^{(3)} = \delta; \\ \frac{m_1^3}{i_3} + d_2^{(3)} m_1^2 + d_1^{(3)} m_1 + d_0^{(3)} = M\delta, \end{cases} \quad (56)$$

где  $M$  — перепад увеличений при изменении  $m$  от величины  $m_1$  до  $m_2$ ;  $\delta$  — величина  $\frac{m^3}{i_3} + d_2^{(3)} m^2 + d_1^{(3)} m + d_0^{(3)}$  при  $m = m_2$ .

При  $m_2 = -m_1$  формулы (56) упрощаются:

$$\begin{cases} d_1^{(3)} = -\frac{m_2^2}{i_3} + \frac{(1-M)\delta}{2m_2}; \\ m_2^2 d_2^{(3)} + d_0^{(3)} = \frac{(1+M)\delta}{2}. \end{cases} \quad (57)$$

Для  $m_2 = 1$  формулы (57) принимают наиболее простой вид

$$\begin{cases} d_1^{(3)} = -\frac{1}{i_3} + \frac{(1-M)\delta}{2}; \\ d_2^{(3)} + d_0^{(3)} = \frac{(1+M)\delta}{2}. \end{cases}$$

При изменении  $m$  от 0 до 1 условия (56) преобразуются к виду

$$\begin{cases} \frac{1}{i_3} + d_2^{(3)} + d_1^{(3)} = (1-M)\delta; \\ d_0^{(3)} = M\delta. \end{cases}$$

Таким образом, при выполнении условий (56) обеспечивается получение заданного перепада увеличений  $M$  системы.

Рассмотрим условия обеспечения допустимого смещения  $\Delta$  плоскости изображения. Так как условия экстремума выражения (52) сложны для анализа (нахождение экстремума сводится к исследованию уравнения шестой степени относительно  $m$ ), то максимальное смещение плоскости изображения ( $\max|\Delta|$ ) при заданных значениях коэффициентов  $c_3^{(3)}$ ,  $c_2^{(3)}$  и  $c_1^{(3)}$  можно характеризовать величиной  $|\delta|$  (аналогично тому, как это делалось при рассмотрении двухкомпонентных систем).

Формулы (54) и (56) позволяют рассчитать параметры СПУ в общем случае — для любых заданных значений перепадов увеличений и перемещений плоскости изображения и любого типа систем (зеркальные, линзовые и зеркально-линзовые). Из указанных формул как частный случай получаются зуммар-системы [49, 50].

## Частные случаи систем переменного увеличения

Выше рассмотрен общий случай трехкомпонентной панкратической системы, когда перемещаются одновременно предметная плоскость и все три компонента с некоторыми передаточными отношениями. Из рассмотренного общего случая можно выделить следующие частные:

1.  $i_0 = 0$ , т. е. предметная плоскость неподвижна, а все три компонента системы перемещаются. Параметры такой системы

характеризуются следующими значениями коэффициентов:  $j=i_1$ ;  $\xi=i_1-i_2$ ;  $\varepsilon=i_3-i_2$ .

2.  $i_0=i_2=0$ , т. е. предметная плоскость и второй компонент неподвижны. Наиболее простая кинематическая связь элементов получается при  $i_3=i_1$ , т. е. когда первый и третий компоненты системы перемещаются одновременно на одну и ту же величину. Для данной системы  $j=i_1$ ;  $\xi=i_1$ ;  $\varepsilon=i_3$ .

3.  $j=-i_0$ ;  $\xi=-i_2$ ;  $\varepsilon=i_3-i_2$ . Эти значения коэффициентов соответствуют системе с неподвижным первым компонентом.

4.  $i_2=0$ , т. е. в системе неподвижным является второй компонент. Для этого случая  $j=i_1-i_0$ ;  $\xi=i_1$ ;  $\varepsilon=i_3$ .

5.  $i_3=0$ ; это соответствует неподвижному третьему компоненту. Практически анализ системы сводится к рассмотрению двухкомпонентной планкратической системы.

Из формул (54) следует, что переход от одного частного случая к другому осуществляется простым умножением рассчитанных параметров системы для выбранного частного случая на множители, зависящие только от передаточных отношений  $i_0$ ,  $i_1$ ,  $i_2$  и  $i_3$ . За исходную СПУ для исследований удобно взять систему, соответствующую случаю 2, от которой можно легко перейти к любому другому частному и общему случаю СПУ.

Т а б л и ц а 8

Система, характеризующаяся коэффициентами	Коэффициенты перехода для						$\beta$
	$i_3^2$	$d_{20}$	$i_2^2$	$x_{10}$	$d_{10}$	$i_1^2$	
$j=i_1$ ; $\xi=i_1-i_2$ ; $\varepsilon=i_3-i_2$	$\frac{i_3-i_2}{i_3}$		$(i_1-i_2) \times \frac{i_3-i_2}{i_3 i_1}$	1		$\frac{i_1-i_2}{i_1}$	1
$j=i_1-i_0$ ; $\xi=i_1$ ; $\varepsilon=i_3$		1			1	$\frac{i_1-i_0}{i_1}$	$\sqrt{\left  \frac{i_1}{i_1-i_0} \right }$
$j=i_1-i_0$ ; $\xi=i_1-i_2$ ; $\varepsilon=i_3-i_2$	$\frac{i_3-i_2}{i_3}$		$(i_1-i_2) \times \frac{i_3-i_2}{i_3 i_1}$	$\frac{i_1-i_0}{i_1}$	$\frac{i_1-i_2}{i_1}$	$\frac{(i_1-i_2) \times (i_1-i_0)}{i_1^2}$	
$j=-i_0$ ; $\xi=-i_2$ ; $\varepsilon=i_3-i_2$	$\frac{i_3-i_2}{i_3 i_1}$		$(-i_2) \times \frac{i_3-i_2}{i_3 i_1}$	$\frac{-i_0}{i_1}$	$\frac{-i_2}{i_1}$	$\frac{i_2 \cdot i_0}{i_1^2}$	$\sqrt{\left  \frac{i_1}{i_0} \right }$

В табл. 8 приведены множители, на которые нужно умножить параметры системы для случая 2, чтобы получить параметры новой системы, характеризуемой коэффициентами  $j$ ,  $\xi$ ,  $\epsilon$ , при этом  $x'_{30}=1$ .

Из табл. 8 видно, что увеличение системы при переходе от случая 2 к любому другому зависит только от движения предметной плоскости. При неподвижной предметной плоскости ( $i_0=0$ ) увеличение системы не зависит от того, двигается ли второй компонент или он неподвижен (в этом случае увеличение зависит только от передаточного отношения  $i_3$ ). При движении предметной плоскости увеличение системы изменяется в  $i_1^{1/2}(i_1-i_0)^{-1/2}$  раз. Следовательно, на участке  $i_1 < i_0 < 0$  увеличение СПУ с подвижной предметной плоскостью больше, чем увеличение системы с неподвижной предметной плоскостью ( $i_0=0$ ), а на участке  $i_0 < 0$  увеличение системы с  $i_0 \neq 0$  меньше увеличения системы с неподвижной предметной плоскостью.

Из предыдущего очевидно, что наиболее подробно необходимо исследовать частный случай 2 панкратических систем ( $i_0=i_2=0$ ).

### **Панкратическая система с неподвижными предметной плоскостью ( $i_0=0$ ) и вторым компонентом ( $i_2=0$ )**

В рассматриваемом случае формулы (54) при  $i_1=1$  принимают вид

$$\begin{aligned} x'_{30} &= d_2^{(3)} i_3^2 - c_3^{(3)} i_3; \\ f_3^2 &= i_3^2 [c_2^{(3)} - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)} (d_2^{(3)} i_3^2 - c_3^{(3)} i_3)]; \\ d_{20} &= d_2^{(3)} i_3^2 + i_3 \frac{d_0^{(3)} i_3 - d_1^{(3)} i_3 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)}) - c_1^{(3)}}{c_2^{(3)} - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)} i_3 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)})}; \\ f_2^2 &= d_1^{(3)} i_3^2 + d_{20} \frac{d_0^{(3)} i_3 - d_1^{(3)} i_3 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)}) - c_1^{(3)}}{c_2^{(3)} - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)} i_3 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)})} - \\ &\quad - \frac{d_0^{(3)} i_3^2 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)})}{c_2^{(3)} - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)} i_3 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)})}; \\ x_0 &= - \frac{d_0^{(3)} i_3^2}{f_2^2} \left[ 1 - \frac{d_{20} x'_{30}}{f_3^2} \right]; \\ d_{10} &= \frac{d_0^{(3)} i_3 - d_1^{(3)} i_3 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)}) - c_1^{(3)}}{c_2^{(3)} - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)} i_3 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)})} - x_0; \\ f_1^2 &= \frac{d_0^{(3)} (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)}) i_3}{c_2^{(3)} - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)} i_3 (d_2^{(3)} i_3 - c_3^{(3)})} - x_0 d_{10}. \end{aligned}$$

На основании формулы (55) увеличение системы

$$\beta = - \frac{f_1 f_2 f_3}{i_3^2 \left[ \frac{m^3}{i_3} + d_2^{(3)} m^2 + d_1^{(3)} m + d_0^{(3)} \right]}.$$

Условия обеспечения перепада (56) для рассматриваемого частного случая те же, что и для общего случая.

При исследовании свойств и расчете систем по предлагаемой методике для обеспечения требуемого смещения ПИ необходимо задать значение величины  $\delta$ , которая связана с величиной  $\Delta_{\max} = \max |\Delta|$ . Величину  $\delta$  задают исходя из максимума числителя выражения (52). Наименьшее максимальное значение числитель имеет в том случае, если он представляет собой полином Чебышева, наименее уклоняющийся от нуля в интервале  $-1 \leq m \leq 1$ .

В качестве числителя  $\Delta$  можно брать и полином Чебышева, наименее уклоняющийся от нуля в интервале  $0 \leq m \leq 1$ , с нулевой точкой.

Если требуется иметь смещение ПИ, равное нулю в нулевом ( $m=0$ ) и двух крайних положениях, то в этом случае  $c_4^{(3)} = 1$ ;  $c_3^{(3)} = 0$ ;  $c_2^{(3)} = -1$ ;  $c_1^{(3)} = 0$  для  $-1 \leq m \leq 1$  и  $c_4^{(3)} = 1$ ;  $c_3^{(3)} = c_1^{(3)} = 0$ ;  $c_2^{(3)} = -\frac{1}{4}$  при  $-\frac{1}{2} \leq m \leq \frac{1}{2}$ . Исследуем подробнее панкратическую систему при  $c_4^{(3)} = 1$ ;  $c_3 = c_1^{(3)} = 0$ ;  $c_2^{(3)} = -1$ . График функции  $f(m) = m^4 - m^2$  показан на рис. 29.

Формулы (54), (55) и (57) при  $c_3^{(3)} = c_1^{(3)} = 0$ ;  $c_2^{(3)} = -1$  имеют вид

$$\begin{aligned} x'_{30} &= d_2^{(3)} i_3^2; \\ f_3^2 &= i_3^2 [-1 - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)^2} i_3^2]; \\ x_0 + d_{10} &= \frac{d_0^{(3)} i_3 - d_1^{(3)} d_2^{(3)} i_3^2}{-1 - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)^2} i_3^2}; \\ d_{20} &= d_2^{(3)} i_3^2 + i_3 \frac{d_0^{(3)} i_0 - d_1^{(3)} d_2^{(3)} i_3^2}{-1 - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)^2} i_3^2}; \\ f_2^2 &= d_1^{(3)} i_3^2 + \frac{d_0^{(3)} i_3 - d_1^{(3)} d_2^{(3)} i_3^2}{-1 - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)^2} i_3^2} d_{20} - \\ &\quad - \frac{d_0^{(3)} d_2^{(3)} i_3^3}{-1 - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)^2} i_3^2}; \\ x_0 &= - \frac{d_0^{(3)} i_3^2}{f_2^2} \left[ 1 - \frac{d_2^{(3)} d_{20}}{-1 - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)^2} i_3^2} \right]; \end{aligned} \quad (58)$$

Рис. 29. График функций  
 $f(m) = m^4 - m^2$

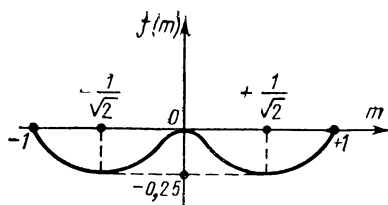


Рис. 30. График функции  
 $f_3^2(i_3)$  при  $d_2^{(3)} = \text{const}$

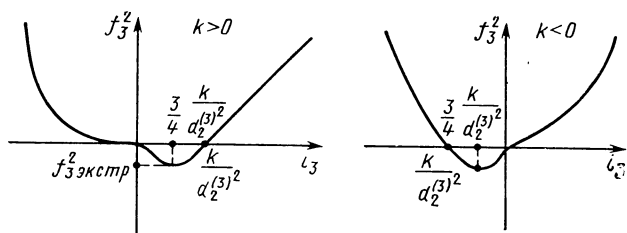


Рис. 31. График функции  
 $f_3^2(d_2^{(3)})$  при  $i_3 = \text{const}$

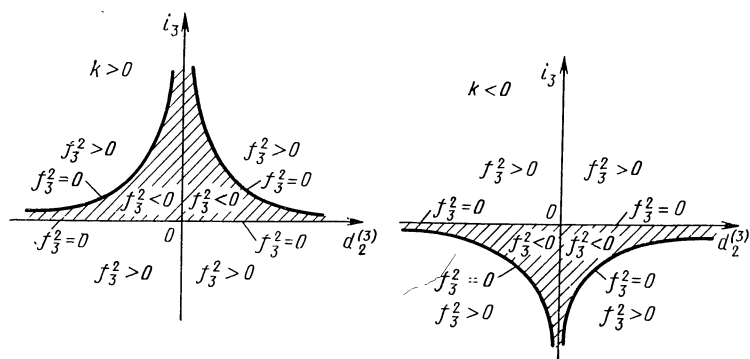
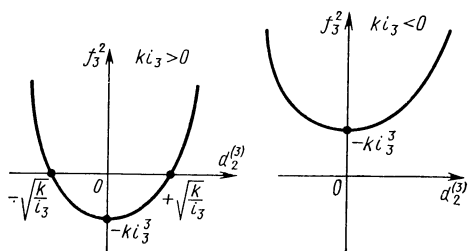


Рис. 32. Области положительных и отрицательных значений  $f_3^2$

$$d_{10} = \frac{d_0^{(3)} i_3 - d_1^{(3)} d_2^{(3)} i_3^2}{-1 - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)2} i_3^2} - x_0;$$

$$f_1^2 = \frac{d_0^{(3)} d_2^{(3)} i_3^2}{-1 - d_1^{(3)} i_3 + d_2^{(3)2} i_3^2} - x_0 d_{10};$$

$$\beta = - \frac{f_1 f_2 f_3}{i_3^2 \left[ \frac{m^3}{i_3} + d_2^{(3)} m^2 + d_1^{(3)} m + d_0^{(3)} \right]};$$

$$d_1^{(3)} = -\frac{1}{i_3} + k; \quad k = \frac{(1-M)\delta}{2}; \quad d_0^{(3)} + d_2^{(3)} = h = \frac{(1+M)\delta}{2}.$$

Так как из формул (58)  $d_1^{(3)} i_3 = k i_3 - 1$ , то

$$f_3^2 = i_3^3 (d_2^{(3)} i_3 - k). \quad (59)$$

Исследуем поведение функции  $f_3^2$  при  $d_2^{(3)} = \text{const}$ :

$$i_3 = 0 \rightarrow f_3^2 = 0; \quad i_3 = \frac{k}{d_2^{(3)2}} \rightarrow f_3^2 = 0; \quad i_3 \rightarrow \pm \infty \rightarrow f_3^2 \rightarrow \infty.$$

Экстремум функции  $f_3^2$  по  $i_3$  находится в точке  $i_3 = \frac{3}{4} \frac{k}{d_2^{(3)2}}$ ,

при этом 
$$f_{3 \text{ экстр}}^2 = -\frac{1}{4} \left( \frac{3}{4 d_2^{(3)2}} \right)^3 k^4 < 0.$$

График функции  $f_3^2$  для  $k > 0$  и  $k < 0$  показан на рис. 30.

Исследуем поведение функции  $f_3^2$  при  $i_3 = \text{const}$ . В этом случае  $f_3^2 = 0$  при  $d_2^{(3)2} = k/i_3$ . Графики функции  $f_3^2$  для  $k i_3 > 0$  и  $k i_3 < 0$  представлены на рис. 31.

Анализируя поведение функции  $f_3^2$  при  $d_2^{(3)} = \text{const}$  и  $i_3 = \text{const}$ , можно построить области на плоскости параметров  $d_2^{(3)}$  и  $i_3$ , где  $f_3^2 > 0$ ,  $f_3^2 < 0$  и  $f_3^2 = 0$  (рис. 32).

Из рис. 32 видно, что заштрихованные области на плоскости параметров  $d_2^{(3)}$  и  $i_3$  вместе с границами  $i_3 = 0$  и  $d_2^{(3)2} i_3 = k$  не могут быть использованы для построения линзовых панкратических систем, так как в этих областях  $f_3^2 \leq 0$  (области  $f_3^2 < 0$  соответствуют наличию зеркального третьего компонента).

На рис. 30, 31 показаны сечения поверхности  $f_3^2$  при  $i_3 = \text{const}$  и  $d_2^{(3)} = \text{const}$ . Как видно из рисунков, функция  $f_3^2 = f_3^2(d_2^{(3)}, i_3)$  экстремума не имеет.

Исследуем поведение функции  $f_2^2$  на плоскости параметров  $d_2^{(3)} \times i_3$ . Преобразуем выражение  $f_2^2$  и приведем его к виду, удобному для анализа. Используя формулы (58) и подставляя  $d_1^{(3)} i_3 = k i_3 - 1$ , получим

$$x_0 + d_{10} = \frac{h - k d_2^{(3)} i_3}{d_2^{(3)2} i_3 - k}; \quad d_{20} = \frac{i_3 (d_2^{(3)2} i_3^2 - 2k d_2^{(3)} i_3 + h)}{d_2^{(3)2} i_3 - k};$$

$$f_2^2 = \frac{i_3 [k i_3 (k^2 - 2h d_2^{(3)} + d_2^{(3)2}) + h^2 - k^2]}{(d_2^{(3)2} i_3 - k)^2}. \quad (60)$$

Рассмотрим графики изменения функции  $f_2^2$  при  $d_2^{(3)} = \text{const}$ .  
В этом случае  $f_2^2 = 0$  при  $i_3 = 0$  и  $i_3 = \frac{k^2 - h^2}{k(k^2 - 2h d_2^{(3)} + d_2^{(3)2})}$ .

Так как

$$h = \frac{(1+M)\delta}{2}; \quad k = \frac{(1-M)\delta}{2}; \quad k^2 - h^2 = -M\delta^2,$$

то, следовательно,

$$i_3 = - \frac{M\delta^2}{k(k^2 - 2h d_2^{(3)} + d_2^{(3)2})}.$$

При  $i_3 = \frac{k}{d_2^{(3)2}}$  и  $i_3 = \pm \infty$   $f_2^2 = \infty$ .

Если  $k > 0$  при  $k^2 - 2h d_2^{(3)} + d_2^{(3)2} > 0$ , то передаточное отношение  $i_3 < 0$ ; при  $k^2 - 2h d_2^{(3)} + d_2^{(3)2} < 0$  передаточное отношение  $i_3 > 0$ ; при  $k^2 - 2h d_2^{(3)} + d_2^{(3)2} = 0$  передаточное отношение  $i_3 = -\infty$ .

Найдем экстремум функции  $f_2^2$  по  $i_3$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial i_3} (f_2^2) &= \frac{[-(h^2 - k^2)(d_2^{(3)2} i_3 + k) - 2k^2 i_3 (k^2 - 2h d_2^{(3)} + d_2^{(3)2})]}{(d_2^{(3)2} i_3 - k)^3} = 0; \\ i_{3 \text{ экстр}} &= - \frac{k(h^2 - k^2)}{(h^2 - k^2) d_2^{(3)2} + 2k^2 (k^2 - 2h d_2^{(3)} + d_2^{(3)2})}; \\ f_{2 \text{ экстр}}^2 &= - \frac{(h^2 - k^2)^2}{4k [(h^2 - k^2) d_2^{(3)2} + k^2 (k^2 - 2h d_2^{(3)} + d_2^{(3)2})]}. \end{aligned} \right\}$$



Графики функции  $f_2^2$  для этого случая показаны на рис. 33. Графики функции  $f_2^2$  при  $k < 0$ ,  $d_2^{(3)} = \text{const}$  представлены на рис. 34.

Исследуем области положительных и отрицательных значений величин  $f_2^2$  на плоскости параметров  $d_2^{(3)}$  и  $i_3$ . Для этого на плос-

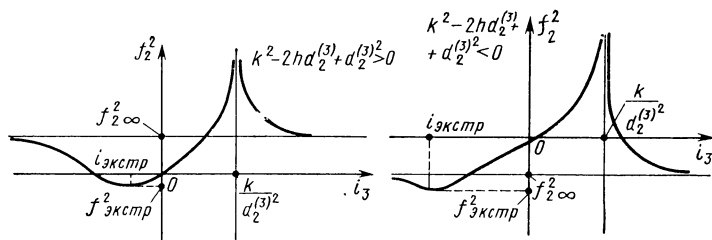


Рис. 33. График функции  $f_2^2(i_3)$  при  $k > 0$  и  $d_2^{(3)} = \text{const}$

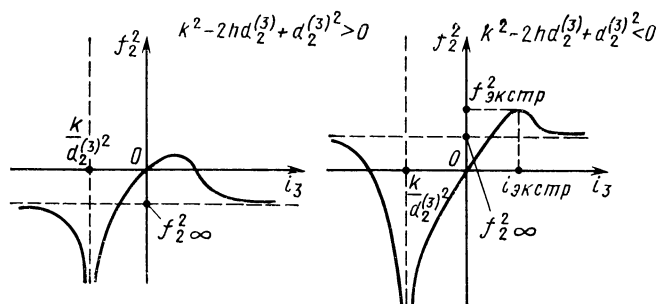


Рис. 34. График функции  $f_2^2(i_3)$  при  $k < 0$  и  $d_2^{(3)} = \text{const}$

кости параметров  $d_2^{(3)}$  и  $i_3$  необходимо построить кривые, соответствующие нулевым значениям  $f_2^2$ .

Из формулы (60) видно, что  $f_2^2 = 0$  при следующем соотношении параметров  $d_2^{(3)}$  и  $i_3$ :

$$i_3 = 0; \quad i_3 = -\frac{h^2 - k^2}{k(k^2 - 2hd_2^{(3)} + d_2^{(3)2})}. \quad (61)$$

Рассмотрим, какую кривую на плоскости параметров  $i_3$  и  $d_2^{(3)}$  представляет уравнение (61),

Передаточное отношение  $i_3 > 0$  при  $k(k^2 - 2hd_2^{(3)} + d_2^{(3)2})$  и передаточное отношение  $i_3 < 0$  при  $k(k^2 - 2hd_2^{(3)} + d_2^{(3)2}) > 0$ .

Квадратный трехчлен  $k^2 - 2hd_2^{(3)} + d_2^{(3)2} = d_0^{(3)2} = M\delta^2 > 0$  при  $d_0^{(3)2} > M\delta$ ;  $k^2 - 2hd_2^{(3)} + d_2^{(3)2} < 0$  при  $d_0^{(3)2} < M\delta^2$ .

Уравнение (61) в переменных  $i_3$  и  $d_0^{(3)}$  выражается формулой

$$i_3 = - \frac{M\delta^2}{d_0^{(3)2} - M\delta^2} \frac{1}{k}.$$

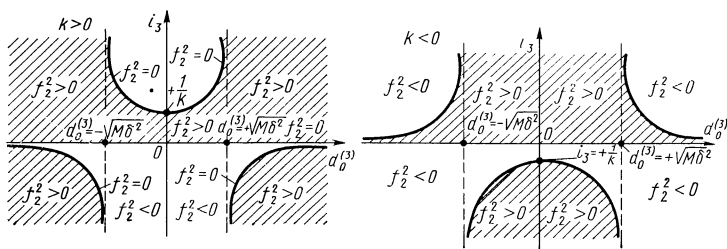


Рис. 35. Области положительных и отрицательных значений  $f_2^2$  при  $k > 0$  и  $k < 0$

Кривые нулевых значений  $f_2^2 = 0$  представлены на рис. 35. Заштрихованные области соответствуют положительным значениям величины  $f_2^2$ , т. е. линзовому второму компоненту. В плоскости параметров  $d_2^{(3)}$  и  $i_3$  области возможных значений  $f_2^2$  остаются теми же, но смещаются от начала координат на величину  $h$  (рис. 36).

На рис. 32 изображена кривая  $i_3 = i_3(d_2^{(3)})$ , для которой  $f_3^2 = 0$ , что соответствует  $f_2^2 = \infty$ , т. е. в точках этой кривой имеется разрыв непрерывности функции  $f_2^2$ . Начертим на плоскости  $d_2^{(3)}$ ,  $i_3$  кривые  $f_2^2 = \infty$ , на которых происходит разрыв непрерывности функции  $f_2^2$  (рис. 37). На рис. 37 заштрихованы в клетку области параметров  $d_2^{(3)}$  и  $i_3$ , для которых одновременно  $f_3^2 > 0$  и  $f_2^2 > 0$  (оба компонента линзовые).

Поведение функции  $f_2^2$  при  $d_2^{(3)} = \text{const}$  было исследовано выше. Рассмотрим графики функции  $f_2^2$  при  $i_3 = \text{const} \neq 0$  ( $i_3 = 0$ ;  $f_2^2 \equiv 0$ ).

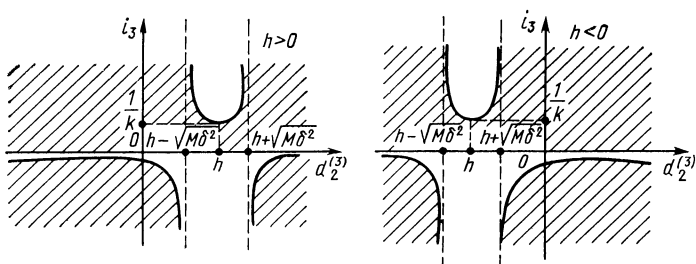


Рис. 36. Области положительных значений  $f_2^2$  на плоскости параметров  $d_2^{(3)}, i_3$  при  $k > 0$

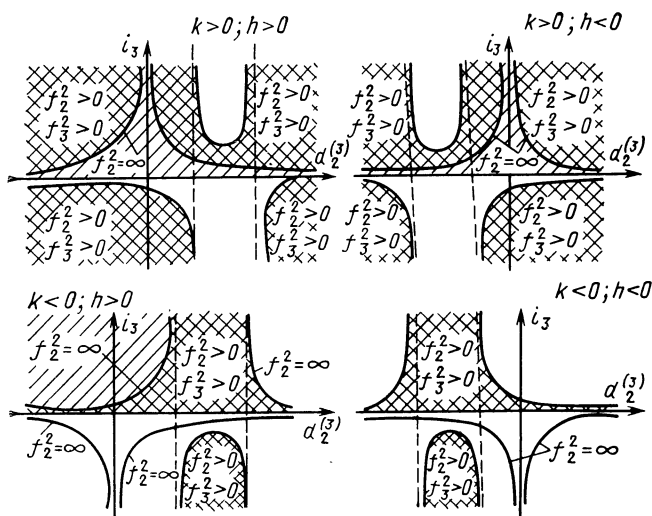


Рис. 37. Области положительных и отрицательных значений  $f_2^2$  и  $f_3^2$  на плоскости параметров  $d_2^{(3)}, i_3$

Пусть  $k > 0$ ;  $i_3 > \frac{1}{k}$ ;  $h > 0$  и  $h < 0$ . График функции в этом случае показан на рис. 38.

Найдем точки, в которых  $f_2^2 = 0$  при  $i_3 = \text{const}$ . Из формулы (60) видно, что  $f_2^2 = 0$  при  $ki_3 (k^2 - 2hd_2^{(3)} + d_2^{(3)2}) + h^2 - k^2 = 0$  или

$$d_{2(1,2)}^{(3)} = h \pm \sqrt{h^2 - \left(k^2 + \frac{h^2 - k^2}{ki_3}\right)}.$$

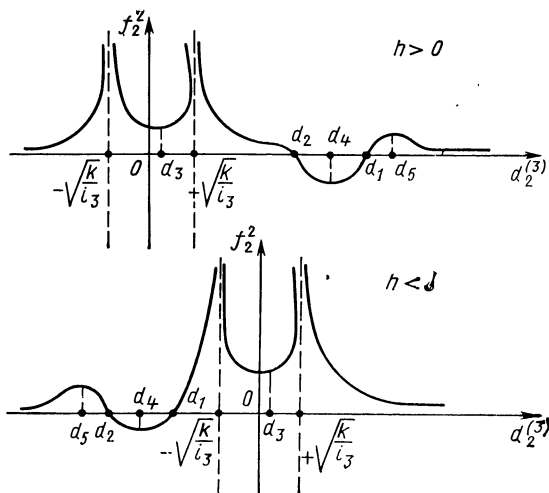


Рис. 38. График функции  $f_2^2(d_2^{(3)})$  при  $k > 0$ ;  $i_3 > \frac{1}{k}$

Экстремумы функции  $f_2^2$  определяются из уравнения

$$k(d_2^{(3)2}i_3 - k)(d_2^{(3)} - h) - 2d_2^{(3)}ki_3(k^2 - 2hd_2^{(3)} + d_2^{(3)2}) - 2d_2^{(3)}(h^2 - k^2) = 0.$$

Решение этого кубического уравнения дает три значения параметра  $d_2^{(3)}$ :  $d_3$ ,  $d_4$ ,  $d_5$ , при которых функция  $f_2^2$  в сечениях  $i_3 = \text{const}$  имеет экстремумы. При  $i_3 < 0$ ,  $k > 0$  графики функции  $f_2^2(i_3 = \text{const})$  представлены на рис. 39.

Графики функции  $f_2^2$  при  $i_3 = \text{const}$  для  $k < 0$ ,  $h > 0$  и  $k < 0$ ,  $h < 0$  симметричны относительно оси  $d_2^{(3)}$  графикам функции  $f_2^2$  при  $k > 0$ ,  $h > 0$  и  $k > 0$ ,  $h < 0$  (рис. 38 и 39); причем график функции  $f_2^2$  при  $i_3 > 0$  соответствует в рассматриваемом случае  $i_3 < 0$ .

Проведем анализ функции  $f_1^2$ . Используя формулы (58) и (59), находим

$$x_0 = \frac{d_0^{(3)} i_3^2}{f_2^2} \left[ 1 - \frac{d_2^{(3)} d_{20}}{i_3 (d_2^{(3)2} i_3 - k)} \right] =$$

$$= - \frac{(h - d_2^{(3)}) (k^2 - h d_2^{(3)}) i_3}{h^2 - k^2 + k i_3 (d_2^{(3)2} - 2h d_2^{(3)} + k^2)};$$

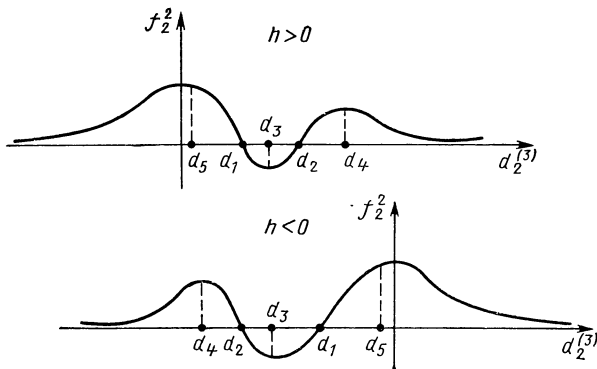


Рис. 39. График функции  $f_2^2(d_2^{(3)})$  при  $k > 0$ ;  $i_3 < 0$

$$d_{10} = \frac{A d_2^{(3)} i_3^2 + B k i_3 + C}{(d_2^{(3)2} i_3 - k) [h^2 - k^2 + k i_3 (d_2^{(3)2} - 2h d_2^{(3)} + k^2)]},$$

где

$$A = -k^2 (d_2^{(3)2} - 2h d_2^{(3)} + k^2) + d_2^{(3)} (h - d_2^{(3)}) (k^2 - h d_2^{(3)});$$

$$B = h (d_2^{(3)2} - 2h d_2^{(3)} + k^2) - (h^2 - k^2) d_2^{(3)} - (h - d_2^{(3)}) (k^2 - h d_2^{(3)});$$

$$C = h (h^2 - k^2).$$

Учитывая полученные выражения для  $x_0$  и  $d_{10}$ , находим выражение для  $f_1^2$ :

$$f_1^2 = \frac{i_3 d_0^{(3)2} (h^2 - k^2) (d_2^{(3)2} i_3 - k)}{[h^2 - k^2 + k (d_2^{(3)2} - 2h d_2^{(3)} + k^2) i_3]^2} = \frac{d_0^{(3)2} M \delta^2 f_3^2}{i_3^2} \times$$

$$\times [h^2 - k^2 + k (d_2^{(3)2} - 2h d_2^{(3)} + k^2) i_3]^{-2}. \quad (62)$$

Проанализировав (62), легко можно построить области положительных и отрицательных значений величин  $f_1^2$ . Из (62) следует, что эти области  $f_1^2$  совпадают с областями величины  $f_3^2$  соответствующего знака (см. рис. 30, 31).

Области положительных и отрицательных значений  $f_1^2$ ,  $f_2^2$  и  $f_3^2$  показаны на рис. 37.

## Симметричные панкратические системы

Исследуем панкратические системы, в которых перепад увеличений  $M$  от среднего положения компонентов ( $m=0$ ) одинаков, т. е.  $\frac{\beta_{\max}}{\beta(0)} = \frac{\beta(0)}{\beta_{\min}}$ . Панкратические системы, удовлетворяющие этому условию, называют симметричными [27]. Выполнение указанного условия, как правило, дает возможность провести лучшую абберационную коррекцию оптической системы на всем диапазоне перемещения компонентов. Проанализируем свойства таких трех-компонентных систем.

Обозначим, как и ранее,  $\frac{m^3}{i_3} + d_2^{(3)}m^2 + d_1^{(3)}m + d_0^{(3)}$  при  $m=1$  через  $\delta$ ,  $\frac{\beta(m=-1)}{\beta(m=1)} = \frac{\beta_2}{\beta_1} = M$  и  $\beta(m=0) = \beta_0$ .

Для рассматриваемого случая  $\beta_0^2 = \beta_1\beta_2$  и, следовательно,  $d_0^{(3)2} = M\delta^2$ . Подставляя в выражение для  $\beta_1$  величины  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$  из (58), получаем

$$\beta_1^2 = i_3 d_0^{(3)2} (h^2 - k^2) [ki_3 (k^2 - 2hd_2^{(3)} + d_2^{(3)2}) + h^2 - k^2]^{-1} \delta^{-2}.$$

Выразим коэффициент  $d_2^{(3)}$  через  $\delta$ ,  $\beta_1$ ,  $i_3$ ,  $M$ , учитывая, что  $h^2 - k^2 = M\delta^2$ :

$$\begin{aligned} d_2^{(3)} &= h \pm \beta_1 \sqrt{\frac{M\delta^2}{i_3} \frac{ki_3 - 1}{k\beta_1^2 - M}} = \\ &= h \pm \beta_1 \delta \sqrt{\frac{M}{i_3} \frac{(1-M)\delta i_3 - 2}{\beta_1^2(1-M)\delta - 2M}}. \end{aligned} \quad (63)$$

Так как  $d_0^{(3)2} = M\delta^2$ , из (63) находим  $i_3 = \frac{\beta_1^2}{M} = \beta_1\beta_2 = \beta_0^2$ , т. е. передаточное отношение между перемещениями первого и третьего компонентов равно квадрату увеличения СПУ в среднем положении при условии, что  $\frac{\beta_2}{\beta_0} = \frac{\beta_0}{\beta_1}$ .

Так как для исследуемого случая  $d_0^{(3)\frac{1}{2}} = M\delta^{\frac{1}{2}}$ ,  $d_2^{(3)} = h \pm \delta\sqrt{M}$ . При этом из (58) имеем следующие формулы для расчета параметров СПУ:

$$\begin{aligned}
 f_1^2 &= \delta i_3 \left[ \delta i_3 \frac{(1 \pm \sqrt{M})^4}{4} - \frac{1-M}{2} \right]; \\
 f_2^2 &= \frac{i_3 M}{\left[ \delta i_3 \frac{(1 \pm \sqrt{M})^4}{4} - \frac{1-M}{2} \right]^2}; \\
 f_3^2 &= \delta i_3^2 \left[ \delta i_3 \frac{(1 \pm \sqrt{M})^4}{4} - \frac{1-M}{2} \right]; \\
 x_0 &= -\delta i_3 \frac{(1 \pm \sqrt{M})^2}{2}; \quad x'_{30} = \frac{\delta i_3^2 (1 \pm \sqrt{M})^2}{2}; \\
 d_{10} &= \frac{\frac{1+M}{2} - \frac{(1 \pm \sqrt{M})^2}{4} \delta i_3 (1-M)}{\delta i_3 \frac{(1 \pm \sqrt{M})^4}{4} - \frac{1-M}{2}} + \\
 &\quad + \frac{\delta i_3 (1 \pm \sqrt{M})^2}{2}; \quad i_3 = \beta_0^2; \\
 d_{20} &= i_3 \left[ \frac{\frac{1+M}{2} - \frac{(1 \pm \sqrt{M})^2}{4} (1-M) \delta i_3}{\delta i_3 \frac{(1 \pm \sqrt{M})^4}{4} - \frac{1-M}{2}} + \frac{(1 \pm \sqrt{M})^2}{2} \delta i_3 \right].
 \end{aligned} \tag{64}$$

Формулы (64) просты и удобны для вычислений и анализа свойств рассматриваемых систем. Их можно еще переписать в таком виде:

$$\begin{aligned}
 f_1^2 &= \delta i_3 \left[ \delta i_3 \frac{(1 \pm \sqrt{M})^4}{2} - \frac{1-M}{2} \right]; \quad f_2 = \pm \frac{\delta i_3}{f_1^2} \sqrt{M i_3}; \\
 f_3 &= \pm i_3 f_1; \quad x_0 = -\delta i_3 \frac{(1 \pm \sqrt{M})^2}{2}; \quad x'_{30} = -i_3 x_0; \\
 |\beta_2| &= \sqrt{\frac{i_3}{M}}; \quad d_{10} = -x_0 + \frac{\frac{1+M}{2} + \frac{1-M}{2} x_0}{f_1^2} \delta i_3; \quad d_{20} = i_3 d_{10}; \\
 |\beta_0| &= \sqrt{i_3}; \quad |\beta_1| = \sqrt{i_3 M}.
 \end{aligned} \tag{65}$$

Анализ формул (64) и (65) позволяет сформулировать следующие свойства таких систем:

- 1) передаточное отношение  $i_3$  всегда больше нуля ( $i_3 = \beta_0^2 > 0$ ) и равно продольному увеличению системы при  $m=0$ ;
- 2) второй компонент всегда линзовый ( $f_2^2 > 0$ );
- 3) первый и третий компоненты могут быть и зеркальными при  $f_1^2 < 0$  и  $f_3^2 < 0$ ;
- 4) величины  $x_0$  и  $x'_{30}$  всегда имеют разные знаки;
- 5) величины  $d_{10}$  и  $d_{20}$  всегда с одинаковыми знаками;

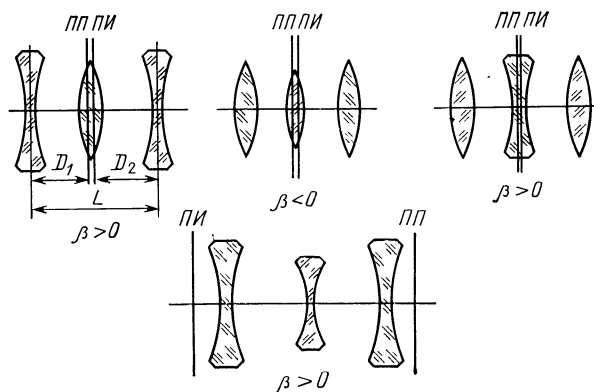


Рис. 40. Типы симметричных систем

6) увеличение системы изменяется от  $|\beta_1| = \sqrt{i_3 M}$  до  $|\beta_2| =$   
 $= \sqrt{\frac{i_3}{M}}$ ;

7) при  $i_3 = 1$ ;  $|\beta_0| = 1$ ;  $|\beta_1| = \sqrt{M}$ ;  $|\beta_2| = \frac{1}{\sqrt{M}}$

$$f_1^2 = f_3^2; \quad x'_{30} = -x_0; \quad d_{20} = d_{10}.$$

Особый интерес представляют системы с передаточным отношением  $i_3=1$ . В этом случае (7-е свойство систем) получаем симметричные системы (рис. 40).

В выражениях (64) и (65) для получения меньших значений смещений плоскости изображения  $\Delta$  перед корнем следует брать знак минус, так как при знаке плюс уже при больших  $\Delta$  (т. е. при малых  $\delta$ ) получаем очень малые значения  $f_2^2$ .

Например, при  $M=4$  и  $i_3=1$ ,  $\delta=1$  при знаке плюс перед  $\sqrt{M}$  имеем соответственно  $f_1^2 = 87/4$  и  $f_2^2 = 0,0084$ , а при знаке минус  $f_1^2 = 1,75$  и  $f_2^2 = 64/49$  и  $\delta = 100 - f_2^2 = \pm 0,0754$ , т. е. практически



такое же значение, как и при  $\delta=1$  в первом случае (при смещении плоскости изображения примерно в 100 раз меньшем).

Для рассматриваемого случая при  $c_3^{(3)} = c_1^{(3)} = 0$ ;  $c_2^{(3)} = -1/4$ ;  $m = \pm 1/2$  параметры СПУ рассчитывают по формулам, аналогичным (65):

$$f_1^2 = i_3 \delta [4i_3 \delta (1 \pm \sqrt{M})^4 + M - 1]; \quad f_2^2 = \frac{i_3^2 M \delta^2}{f_1^4}; \quad f_3^2 = i_3^2 f_1^2;$$

$$x_0 = -2\delta i_3 (1 \pm \sqrt{M})^2; \quad x'_{30} = -i_3 x_0; \quad d_{20} = i_3 d_{10};$$

$$d_{10} = \frac{\delta i_3 [(1+M) + 2(1-M)x_0]}{2f_1^2} - x_0; \quad |\beta_0| = \sqrt{i_3};$$

$$|\beta_1| = \sqrt{i_3 M}.$$

При  $0 \leq m \leq 1$  параметры системы рассчитывают по формулам (54), в которых коэффициенты  $d_2^{(3)}$ ,  $d_1^{(3)}$ ,  $d_0^{(3)}$ , удовлетворяющие условию  $\beta_0 = \beta_1 \beta_2$ , определяются формулами:

$$d_2^{(3)} = -\frac{1,5}{i_3} + k + \delta [(1 \pm 2\sqrt{M})^2 - M]; \quad d_0^{(3)} = M\delta;$$

$$d_1^{(3)} = \frac{1}{2i_3} - \delta [(1 \pm 2\sqrt{M})^2 - M].$$

Следует отметить важные достоинства предлагаемой методики.

1. Параметры систем переменного увеличения более общего типа, чем у Бергстейна [51], рассчитываются по менее сложным формулам; они определяются непосредственно значениями передаточного отношения  $i_3$ , перепадом увеличений  $M$  и величиной  $\delta$ , характеризующей максимальное смещение  $\Delta_{\max}$  плоскости изображения.

2. Не прибегая к громоздким вычислениям, предлагаемая методика по сравнению с методикой Бергстейна, позволяет легко получить значение  $\delta$  при заданном  $M$ , определяющее систему наименьшей длины, без применения вычислительных машин.

Проиллюстрируем это на примере. Для частного случая систем, которые рассматриваются в теории расчета Бергстейна ( $i_3=1$ ), получаем следующее уравнение, которое позволяет найти величину  $\delta$  при заданном перепаде увеличений  $M$ , определяющую систему наименьшей длины:

$$(D_1 = f'_1 + f'_2 + d_{10} + i_2 m = 1; \quad D_2 = f'_2 + f'_3 + d_{20} + i_3 m = 0);$$

$$(192\omega^4 j - 2BC) \delta^3 + (48j^2 \omega^2 - B^2 - 2AC) \delta^2 + (4j^3 - 2AB) \delta - A^2 = 0, \quad (66)$$

где

$$A = -2(1 \mp M); \quad B = 4\omega(\omega - 2\gamma);$$

$$C = -16\omega^3; \quad \omega = (1 - \sqrt{M})^2; \quad j = M - 1.$$

Уравнение (66) третьей степени относительно  $\delta$ , которое легко решается.

Параметры систем наименьшей длины, рассчитанные для некоторых  $M$ , при  $c_3^{(3)} = c_1^{(3)} = 0$ ;  $c_2^{(3)} = -1$ ;  $-1 \leq m \leq +1$ , приведены в табл. 9. По методике Бергстейна такой расчет проводится довольно сложно [33], хотя системы получаются практически того же вида, что и рассматриваемые (они близки к симметричным системам, что имеет место в нашем случае при  $i_3 = 1$ ).

В табл. 10 приводятся параметры ряда СПУ симметричного типа, представляющих практический интерес.

## Зеркальные и зеркально-линзовые системы

Рассмотрим возможность построения зеркальных и зеркально-линзовых трехкомпонентных панкратических систем [21]. Этот вопрос представляет большой интерес при проектировании панкратических систем для ИК техники длиннофокусных объективов с небольшими размерами и т. д.

Поскольку выбор оптических материалов, имеющих удовлетворительные физико-механические свойства и требуемое пропускание в УФ и ИК областях спектра, весьма ограничен, то в связи с интенсивным развитием ИК техники, УФ и ИК микроскопии все более широко используется отражательная оптика — зеркальные и зеркально-линзовые системы высокого качества. Простота и компактность конструкции, полное отсутствие или незначительные хроматические aberrации, а также малые потери на поглощение создают предпосылки для широкого применения зеркальных и зеркально-линзовых систем в оптико-электронных устройствах различного рода. Поэтому исследование возможностей зеркальных и зеркально-линзовых систем, безусловно, представляет большой практический интерес. Особое место среди них занимают зеркально-линзовые системы с передаточными отношениями  $i_0 = i_2 = 0$ ,  $i_1 = i_3 = 1$ , так как в этом случае иногда удается осуществить простейшие схемы систем, в которых происходит перемещение всего одного конструктивного элемента.

Поскольку при выводе формулы смещения плоскости изображения  $\Delta$  использовалось уравнение Ньютона в виде  $xx' = -f^2$ , то отрицательным значениям величин  $f^2$  соответствует формула Ньютона для зеркальных систем [2]. Следовательно, если при расчете величин  $f_1^2$ ,  $f_2^2$ ,  $f_3^2$  по формулам (54) получается отрицательная величина, то это значит, что данный компонент должен быть зеркальным, если положительная, то линзовым. Для построения зеркальных и зеркально-линзовых оптических систем переменного увеличения необходимо исследовать области положительных и отрицательных значений величин  $f_1^2$ ,  $f_2^2$  и  $f_3^2$  в зависимости от коэффициентов  $c_3^{(3)}$ ,  $c_2^{(3)}$ ,  $d_2^{(3)}$ ,  $d_1^{(3)}$ ,  $c_1^{(3)}$ ,  $d_0^{(3)}$  выражения (52) и передаточных отношений  $i_3$ ,  $i_2$ ,  $i_1$  и  $i_0$ .

Области построения возможных линзовых, зеркальных и зеркально-линзовых систем для основного случая ( $i_0 = i_2 = 0$ ) рассмотрены выше (см. рис. 32, 35). Поэтому построим области положительных и отрицательных значений величин  $f_1^2$ ,  $f_2^2$  и  $f_3^2$  на плоскости параметров  $i_2$ ,  $i_0$ . Обозначим значения квадратов фокусных

Таблица 9

M	$i_3$	$\delta$	$f_1^2$	$f_2^2$	$f_3^2$	$x_0$	$x'_{30}$	$d_{10}$	$d_{20}$	$\Delta_{\max}$
2		-70,99	1,59114	3981,04	1,5911	6,0897	-6,0897	6,28342	6,28342	0,00352
3		-16,08	2,48802	125,355	2,48802	4,3094	-4,3094	10,6189	10,6189	0,01057
4	1	-8	4	16	4	4	-4	3	3	0,03125
5		-5,545	6,8541	3,2725	6,9541	4,2361	-4,2361	0,19098	0,19098	0,04508
6		-4,772	13,1986	0,7842	13,1986	5,01279	-5,0127	-1,7474	-1,7474	0,05239
7		-5,066	31,8745	0,1768	31,8745	6,861	-6,861	-4,2252	-4,2252	0,04934

Таблица 10

M	$i_3$	$\delta$	$f_1^2$	$f_2^2$	$f_3^2$	$x_0$	$x'_{30}$	$d_{10}$	$d_{20}$	$\Delta_{\max}$
$c_3^{(3)}=c_1^{(3)}=0; c_2^{(3)}=-1; -1 \leq m \leq +1$										
4	1	5	13,75	0,5289	13,75	-2,5	2,5	4,7727	4,7727	0,0125
5	0,5		8,6475	0,2089	2,1619	-1,909	0,9549	3,8814	1,9407	0,0125
4		5	24,589	0,2067	24,5898	-3,819	3,8197	5,983	5,9830	0,0125
2		20	130	0,0947	130	-10	10	12,6923	12,6923	0,00313
7	1	100	123,593	1,3093	123,593	-8,579	8,5786	13,2628	13,2628	0,999625
4		-5	30,8497	0,1839	30,8497	6,7712	-6,7712	-4,1272	-4,1272	0,0125
5		-10	10	4	10	+5	-5	0	0	0,00625
4			38,3592	0,3398	38,3592	7,6393	-7,6393	-4,4184	-4,4184	0,00625
5	0,5	-20	38,3592	0,3265	70	10	-10	-6,5	-6,5	0,003125
2	1	-80	7,0996	253,946	9,5898	7,6393	-3,8197	-4,4184	-2,2192	0,003125
		-100	23,5931	35,5931	23,5931	6,8629	-6,8629	14,9012	14,9012	0,00078
						8,5786	-8,5786	3,24396	3,24396	0,000625

Продолжение табл. 10

$M$	$i_3$	$\delta$	$f_1^2$	$f_2^2$	$f_3^2$	$x_0$	$x'_{30}$	$d_{10}$	$d_{20}$	$\Delta_{\max}$
$c_3^{(3)}=c_1^{(3)}=0; c_2^{(3)}=-0,25; -0,5 \leq m \leq +0,5$										
3	1	-2	0,5950	33,8967	0,59502	2,1436	-2,1436	5,5445	5,5445	0,0039
5	0,5	-3	5,3375	0,08775	1,3344	3,0557	-1,5279	-1,3278	-0,6639	0,0039
		-5	4,3387	1,4343	4,3387	3,2154	-3,2154	-0,1517	-0,1517	0,0026
3	1	5	18,7187	0,2140	18,7187	5,3590	-5,3590	-3,0303	-3,0303	0,00156
		20	38,7187	0,05003	38,7187	-5,3590	5,3589	7,0013	7,0013	0,00156
			67,0996	0,1777	67,0996	-6,8629	9,3556	9,3556	9,3556	0,00039
2	0,1	50	7,9437	0,07944	0,07944	-1,7157	0,1716	3,7398	0,37398	0,00016
	0,5		98,5931	0,06430	24,6483	-8,5786	4,2893	11,1343	5,5671	0,00016
2	1	50	344,373	0,04216	344,373	-17,157	17,1573	19,8662	19,8662	0,00016
$c_3^{(3)}=-1,9209; c_2^{(3)}=1,1135; c_1^{(3)}=-0,1835; 0 \leq m \leq 1$										
2	1	5	9,5238	0,7637	7,7902	-1,5022	2,1366	4,5142	3,2278	0,00172
3	0,25	3	5,7757	0,0589	0,2607	-1,1851	0,4402	3,5379	0,5481	0,00182
2	0,5		2,0057	0,7266	0,4266	-0,1278	0,4678	2,2824	0,8555	0,003
3		-5	2,3562	1,7459	0,5934	3,2124	1,1293	1,4879	0,2604	0,00182
5	0,25	-3	2,2517	0,1331	0,151	2,7739	-0,4677	0,2352	0,1957	0,003

расстояний при  $i_0 = i_2 = 0$  через  $f_{10}^2$ ,  $f_{20}^2$ ,  $f_{30}^2$ , которые являются функциями величин  $i_3$ ,  $c_3^{(3)}$ ,  $c_2^{(3)}$ ,  $c_1^{(3)}$ ,  $d_2^{(3)}$ ,  $d_1^{(3)}$ ,  $d_0^{(3)}$ . Тогда условие положительных значений величины запишется так:

$$\frac{i_3 - i_2}{i_3} > 0 \text{ при } f_{30}^2 > 0 \text{ и } \frac{i_3 - i_2}{i_3} < 0 \text{ при } f_{30}^2 < 0. \quad (67)$$

Функция  $f_3^2 < 0$ , если

$$\frac{i_3 - i_2}{i_3} < 0 \text{ при } f_{30}^2 > 0 \text{ и } \frac{i_3 - i_2}{i_3} > 0 \text{ при } f_{30}^2 < 0. \quad (68)$$

Условие положительных значений величины  $f_2^2$  следующее:

$$(i_1 - i_2) \frac{i_3 - i_2}{i_3} > 0 \text{ при } f_{20}^2 > 0 \text{ и } (i_1 - i_2) \frac{i_3 - i_2}{i_3} < 0 \text{ при } f_{20}^2 < 0. \quad (69)$$

Условия, при которых  $f_2^2 < 0$ :

$$(i_1 - i_2) \frac{i_3 - i_2}{i_3} < 0 \text{ при } f_{20}^2 > 0 \text{ и } (i_1 - i_2) \frac{i_3 - i_2}{i_3} > 0 \text{ при } f_{20}^2 < 0. \quad (70)$$

Величина  $f_1^2$  положительна при

$$(i_1 - i_2) (i_1 - i_0) > 0 \text{ для } f_{10}^2 > 0 \text{ и } (i_1 - i_2) (i_1 - i_0) < 0 \text{ для } f_{10}^2 < 0. \quad (71)$$

Величина  $f_1^2 < 0$  при

$$(i_1 - i_2) (i_1 - i_0) < 0 \text{ для } f_{10}^2 > 0 \text{ и } (i_1 - i_2) (i_1 - i_0) > 0 \text{ для } f_{10}^2 < 0. \quad (72)$$

Из неравенств (67)–(72) при  $f_{10}^2 > 0$ ,  $f_{20}^2 > 0$ ,  $f_{30}^2 > 0$  получаем

$$\left. \begin{aligned} f_1^2 &> 0 \text{ при } i_2 < i_1, i_0 < i_1 \text{ и } i_2 > i_1, i_0 > i_1; \\ f_2^2 &> 0 \text{ при } i_2 < i_1, i_2 < i_3 \text{ и } i_2 > i_1, i_2 > i_3 \text{ [при } i_3 > 0] \text{ и} \\ &\quad i_2 > i_3, i_2 < i_1 \text{ и } i_2 > i_1, i_2 < i_3; \\ f_3^2 &> 0 \text{ при } i_2 < i_3 (i_3 > 0) \text{ и } i_2 > i_3 (i_3 < 0); \end{aligned} \right\} \quad (73)$$

$$\left. \begin{aligned} f_1^2 &< 0 \text{ при } i_2 < i_1, i_0 > i_1 \text{ и } i_2 > i_1, i_0 < i_1; \\ f_2^2 &< 0 \text{ при } i_3 < i_2 < i_1 (0 < i_3 < i_1), i_1 < i_2 < i_3 (i_3 > i_1) \text{ и} \\ &\quad i_2 > i_1 \text{ и } i_2 < i_3 (i_3 < 0); \\ f_3^2 &< 0 \text{ при } i_2 > i_3 (i_3 > 0) \text{ и } i_2 < i_3 (i_3 < 0). \end{aligned} \right\} \quad (74)$$

Неравенства (73) и (74) разбивают плоскость  $i_0, i_2$  на ряд областей, в которых величины  $f_1^2, f_2^2$  и  $f_3^2$  имеют положительное или отрицательное значение, что соответствует линзовому или зеркальному компоненту системы переменного увеличения. Эти области для  $i_3 > 0$  и  $i_3 < 0$  представлены на рис. 41. Плоскость передаточных отношений  $i_2$  и  $i_0$  для  $i_3 > 0$  и  $i_3 < 0$  разбилась на шесть областей. Анализируя рис. 41, можно сделать вывод, что для построения линзовых систем переменного увеличения передаточные отношения  $i_2$  и  $i_0$  нужно выбирать в области I, зеркальных — II, зеркально-линзовых — III, IV, V, VI, VII, VIII. Аналогично можно построить

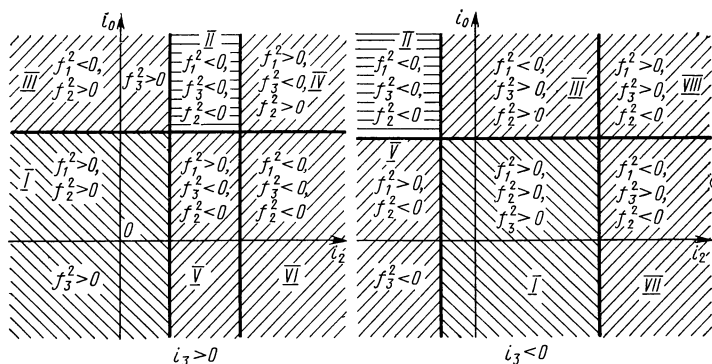


Рис. 41. Области отрицательных и положительных значений  $f_1^2, f_2^2$  и  $f_3^2$

области параметров  $i_2$  и  $i_0$ , соответствующие положительным и отрицательным значениям величин  $f_1^2, f_2^2$  и  $f_3^2$  при  $f_{10}^2 < 0, f_{20}^2 < 0$  и  $f_{30}^2 < 0$ .

Используя зависимость знаков величин  $f_{10}^2, f_{20}^2$  и  $f_{30}^2$  от передаточного отношения  $i_3, i_1$ , можно найти области, зависящие от всех передаточных отношений  $i_2, i_0$  и  $i_3, i_1$ , в которых возможно построение линзовых, зеркальных или зеркально-линзовых систем переменного увеличения.

## Свойства трехкомпонентных панкратических систем с неподвижными ПП и вторым компонентом

Анализ выражений (53) и (54), определяющих параметры трехкомпонентной панкратической системы, позволяет выявить некоторые интересные свойства таких систем.

1. Если в формулах (54) изменить знаки коэффициентов  $c_3^{(3)}, c_1^{(3)}, d_2^{(3)}$  и  $d_0^{(3)}$  на обратные, то знаки величин  $x_{30}', x_0, d_{10}$  и  $d_{20}$  также меняются на обратные. Перепад увеличений в новой системе  $M_1 = 1/M$  при изменении параметра  $m$  в интервале  $-m_2 \leq m \leq -m_1$ .

2. Изменение знаков коэффициентов  $d_0^{(3)}$ ,  $d_1^{(3)}$ ,  $d_2^{(3)}$  и  $i_3$  на обратные приводит к изменению знаков величин  $x'_{30}$ ,  $d_{20}$  и  $f_2^2$  на обратные. Перепад увеличений  $M_1=M$  при  $m_1 \leq m \leq m_2$ .

3. Изменение знаков коэффициентов  $c_3^{(3)}$ ,  $c_1^{(3)}$ ,  $d_1^{(3)}$  и  $i_3$  на обратные приводит к изменению знаков величин  $x_{10}$ ,  $d_{10}$  и  $f_2^2$ . Перепад увеличений  $M_1=1/M$  при  $-m_2 \leq m \leq -m_1$ .

Учет рассмотренных свойств трехкомпонентных панкратических систем значительно облегчают их анализ и расчет. Система, рассчитанная для заданных значений коэффициентов в выражении (54), служит основой для построения еще ряда новых панкратических систем [29].

## Расчет панкратических систем с большим перепадом

Изложенная ранее методика расчета двухкомпонентных панкратических систем с большим перепадом увеличений  $M$  может быть эффективно применена и к трехкомпонентным системам, для которых можно получить и меньшие (по сравнению с двухкомпонентными системами) значения  $\Delta_{\max}$ . Покажем это на следующем примере. По табл. 16 выбираем систему со следующими параметрами:  $M=10$ ;  $i_3=1$ ;  $f_2^2=0,0372$ ;  $d_{20}=-28,4532$ ;  $x_0=0,8809$ ;  $f_3^2=855$ ;  $d_{10}=0,6657$ ;  $f_1^2=0,1161$ ;  $x'_{30}=-30$ . По этим параметрам рассчитываем значения  $\Delta=\Delta(m)$  и  $\delta=\delta(m)$  (табл. 11).

Т а б л и ц а 11

$m$	0,5	0,35	0	-0,5	-1
$\Delta$	0	0,00195		0	-0,00783
$\delta$	-5	-7,97	-20	-50	-95,75

Анализируя результаты расчетов, приведенные в табл. 11, видим, что для рассматриваемой системы можно расширить перепад увеличений с  $M=10$  до  $M=19$  при изменении  $m$  в диапазоне  $-1 \leq m \leq 0,5$  и получить  $\Delta_{\max} \approx 0,005$ , т. е. в 8—10 раз меньше, чем для двухкомпонентных систем. Полученная система имеет к тому же и меньшие габаритные размеры.

## 5. $n$ -КОМПОНЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ

Вопросу расчета  $n$ -компонентных панкратических систем посвящена практически одна работа Бергстейна [51]. Однако в ней дана теория расчета систем, являющихся частным случаем систем, методика расчета которых разработана автором и излагается в настоящей монографии: в работе Бергстейна исследуются системы, в которых перемещение компонентов осуществляется с передаточным отношением  $i=1$  (рис. 42). Методика расчета таких панкрати-

ческих систем подробно изложена в [9, 10, 45, 49, 50, 51], а также в ряде работ, в которых эта методика практически реализована для расчета трех- и пятикомпонентных панкратических систем [53, 54].

Ниже изложен метод расчета гауссовых элементов  $n$ -компонентных панкратических систем общего вида, простейшим частным случаем которых являются и системы Бергштейна.

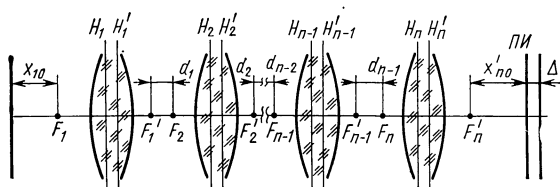


Рис. 42. Схема  $n$ -компонентной панкратической системы

Рассмотрим оптическую систему, состоящую из  $n$  компонентов, увеличение которой изменяется при перемещении всех компонентов системы на величины  $i_k m$  (где  $i_k = \text{const}$ ,  $k=1, 2, 3, \dots, n$ , а  $m$  — переменный параметр) и предметной плоскости на величину  $i_0 m$  от некоторого начального положения.

Обозначим, как и ранее, передние фокусные расстояния компонентов через  $f_1, f_2, \dots, f_n$ ; расстояния между задними фокусами предыдущих компонентов и передними фокусами последующих компонентов через  $d_1, d_2, \dots, d_{n-1}$ ; расстояние от предметной плоскости до переднего фокуса первого компонента через  $x_{10}$ , расстояние от заднего фокуса последнего компонента до плоскости изображения через  $x'_{n0}$ ; смещение плоскости изображения через  $\Delta$  (см. рис. 42).

Выведем формулы, определяющие смещение плоскости изображения через параметры системы переменного увеличения ( $x_{10}, f_k, d_{k-1}, x'_{k0}$ ,  $k=1, 2, \dots, n$ ), и выражение параметров системы через коэффициенты, определяющие зависимость смещения плоскости изображения [18].

Докажем, что для любого числа  $n$  компонентов выражение для смещения плоскости изображения имеет следующий вид:

$$\Delta = \frac{f(m)}{\delta(m)} = \frac{\sum_{k=0}^{n+1} c_k^{(n)} m^k}{\sum_{k=0}^n d_k^{(n)} m^k}, \quad (75)$$

где индекс  $n$  означает число компонентов рассматриваемой системы переменного увеличения.

Доказательство проведем методом математической индукции.



Пусть мы имеем выражение для

$$x'_n = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} a_k^{(n)} m^k}{\sum_{k=0}^n b_k^{(n)} m^k}; \quad (76)$$

покажем, что тогда и выражение для

$$x'_{n+1} = \frac{\sum_{k=0}^n a_k^{(n+1)} m^k}{\sum_{k=1}^{n+1} b_k^{(n+1)} m^k}. \quad (77)$$

Текущие значения  $d_k$ ,  $x_{k+1}$  и  $\Delta_{k+1}$  выражаются через  $i_k$  и  $m$  так:

$$d_k = d_{k0} + (i_{k+1} - i_k) m;$$

$$x_{k+1} = x'_k - d_k;$$

$$\Delta_{k+1} = x'_{k+1} - x'_{(n+1)0} + i_{k+1} m \quad (k = 1, 2, \dots, n).$$

Индекс «0» соответствует нулевому положению системы ( $m=0$ ).  
Зная  $x'_n$ , найдем выражение для величины

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x'_n - d_n = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} a_k^{(n)} m^k}{\sum_{k=0}^n b_k^{(n)} m^k} - d_{n0} - (i_{n+1} - i_n) m = \\ &= \frac{\sum_{k=0}^{n-1} [a_k^{(n)} - d_{n0} b_k^{(n)} - (i_{n+1} - i_n) b_{k-1}^{(n)}] m^k - \sum_n^{n+1} (i_{n+1} - i_n) \times \\ &\quad \times b_{k-1}^{(n)} m^k - d_{n0} b_n^{(n)} m^n}{\sum_{k=0}^n b_k^{(n)} m^k} ; \\ &= \frac{-f_{n+1}^2 \sum_{k=0}^n b_k^{(n)} m^k}{\sum_{k=0}^{n-1} [a_k^{(n)} - d_{n0} b_k^{(n)} - (i_{n+1} - i_n) b_{k-1}^{(n)}] m^k - \sum_n^{n+1} (i_{n+1} - i_n) \times \\ &\quad \times b_{k-1}^{(n)} m^k - d_{n0} b_n^{(n)} m^n}, \end{aligned}$$

т. е. то же получилось выражение вида (76)

$$x'_{n+1} = \frac{\sum_{k=0}^n a_k^{(n+1)} m^k}{\sum_{k=0}^{n+1} b_k^{(n+1)} m^k},$$

где

$$\begin{aligned} a_k^{(n+1)} &= -f_{n+1}^2 b_k^{(n)} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n); \\ b_k^{(n+1)} &= a_k^{(n)} - d_{n0} b_k^{(n)} - (i_{n+1} - i_n) b_{k-1}^{(n)} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n-1); \\ b_n^{(n+1)} &= -(i_{n+1} - i_n) b_{n-1}^{(n)} - d_{n0} b_n^{(n)}; \\ b_{n+1}^{(n+1)} &= -(i_{n+1} - i_n) b_n^{(n)}. \end{aligned} \quad (78)$$

Определяем зависимость смещения плоскости изображения  $\Delta_{n+1}$  от параметров оптической системы и величины  $m$ :

$$\begin{aligned} \Delta_{n+1} &= x'_{n+1} - x'_{(n+1)0} + i_{n+1} m = \\ &= \frac{\sum_{k=0}^n [a_k^{(n+1)} - x'_{(n+1)0} b_k^{(n+1)} + i_{n+1} b_{k-1}^{(n+1)}] m^k -}{\sum_{k=0}^{n+1} b_k^{(n+1)} m^k} = \\ &= \frac{\sum_{k=0}^{n+2} c_k^{(n+1)} m^k}{\sum_{k=0}^{n+1} d_k^{(n+1)} m^k}. \end{aligned} \quad (79)$$

Получено выражение (79) аналогично (75), что и требовалось доказать. Таким образом, выражение (79) будет справедливо для любого  $n$ , поскольку оно справедливо для  $n=2$  и  $n=3$  [16, 17].

Коэффициенты  $c_k^{(n+1)}$  и  $d_k^{(n+1)}$  в выражении (79) соответственно равны:

$$c_k^{(n+1)} = a_k^{(n+1)} - x'_{(n+1)0} b_k^{(n+1)} + i_{n+1} b_{k-1}^{(n+1)} \quad (k = 0, 1, \dots, n); \quad (80)$$

$$c_{n+1}^{(n+1)} = i_{n+1} b_n^{(n+1)} - x'_{(n+1)0} b_{n+1}^{(n+1)}; \quad (81)$$

$$c_{n+2}^{(n+1)} = i_{n+1} b_{n+1}^{(n+1)};$$

$$d_k^{(n+1)} = b_k^{(n+1)} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n). \quad (82)$$

Свободный член числителя  $c_0^{(n+1)}$  выражения (79) равен нулю:

$$c_0^{(n+1)} = a_0^{(n+1)} - x'_{(n+1)0} b_0^{(n+1)} = a_0^{(n+1)} - \frac{a_0^{(n+1)}}{b_0^{(n+1)}} b_0^{(n+1)} = 0;$$

здесь вместо величины  $x'_{(n+1)0}$  подставлено ее значение из выражения (77). Таким образом, суммирование в числителе (79) можно производить не с  $k=0$ , а с  $k=1$ .

Теперь найдем выражение параметров системы переменного увеличения через коэффициенты  $c_k^{(n+1)}$  и  $d_k^{(n+1)}$ . Из формулы (81), учитывая (82), получаем

$$x'_{(n+1)0} = \frac{1}{d_{n+1}^{(n+1)}} [i_{n+1} d_n^{(n+1)} - c_{n+1}^{(n+1)}].$$

Из (80) выражаем  $c_n^{(n+1)}$  ( $k=n$ ):

$$c_n^{(n+1)} = a_n^{(n+1)} - x'_{(n+1)0} b_n^{(n+1)} + i_{n+1} b_{n-1}^{(n+1)}. \quad (83)$$

Подставляя в формулу (83) выражение коэффициента  $a_n^{(n+1)}$  из (78) и учитывая (82), получаем выражение для величины  $f_{n+1}^2$ :

$$f_{n+1}^2 = [i_{n+1} d_{n-1}^{(n+1)} - x'_{(n+1)0} d_n^{(n+1)} - c_n^{(n+1)}] \frac{1}{d_n^{(n)}}.$$

Найдем выражение для величины  $d_{n0}$ , пользуясь формулой (78):

$$d_{n0} = -\frac{1}{d_n^{(n)}} [d_n^{(n+1)} + (i_{n+1} - i_n) d_{n-1}^{(n)}].$$

Из (78) находим

$$b_{n-1}^{(n)} = d_{n-1}^{(n)} = -\frac{a_{n-1}^{(n+1)}}{f_{n+1}^2}. \quad (84)$$

Коэффициент  $c_{n-1}^{(n+1)}$  получаем из (80) при  $k=n-1$ :

$$c_{n-1}^{(n+1)} = a_{n-1}^{(n+1)} - x'_{(n+1)0} d_{n-1}^{(n+1)} + i_{n+1} d_{n-2}^{(n+1)}. \quad (85)$$

Подставляя значение  $a_{n-1}^{(n+1)}$  из (85) в (84), находим

$$d_{n-1}^{(n)} = -\frac{1}{f_{n+1}^2} [c_{n-1}^{(n+1)} + x'_{(n+1)0} d_{n-1}^{(n+1)} - i_{n+1} d_{n-2}^{(n+1)}]. \quad (86)$$

Таким образом, учитывая (86), получаем выражения для  $d_{n0}$  в таком виде:

$$d_{n0} = \frac{i_{n+1} - i_n}{f_{n+1}^2 d_n^{(n)}} [c_{n-1}^{(n+1)} + x'_{(n+1)0} d_{n-1}^{(n+1)} - i_{n+1} d_{n-2}^{(n+1)}] - \frac{d_n^{(n+1)}}{d_n^{(n)}}.$$

Окончательно для  $x'_{(n+1)0}$ ,  $f_{n+1}^2$ ,  $d_{n0}$ ,  $x_{(n+1)0}$ , учитывая, что  $d_n^{(n)} = -\frac{d_{n+1}^{(n+1)}}{i_{n+1} - i_n}$ , имеем следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} x'_{(n+1)0} &= \frac{1}{d_{n+1}^{(n+1)}} [i_{n+1} d_n^{(n+1)} - c_{n+1}^{(n+1)}]; \\ f_{n+1}^2 &= \frac{i_{n+1} - i_n}{d_{n+1}^{(n+1)}} [c_n^{(n+1)} + x'_{(n+1)0} d_n^{(n+1)} - i_{n+1} d_{n-1}^{(n+1)}]; \\ d_{n0} &= \frac{i_{n+1} - i_n}{d_{n+1}^{(n+1)}} \left\{ d_n^{(n+1)} - \frac{i_{n+1} - i_n}{f_{n+1}^2} [c_{n-1}^{(n+1)} + \right. \\ &\quad \left. + x'_{(n+1)0} d_{n-1}^{(n+1)} - i_{n+1} d_{n-2}^{(n+1)}] \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (87)$$

Полученные выражения (87) позволяют вычислять все параметры  $n$ -компонентной системы переменного увеличения:

$$\begin{aligned} f_k^2 &= \frac{i_k - i_{k-1}}{d_k^{(k)}} [c_{k-1}^{(k)} + x'_{k0} d_{k-1}^{(k)} - i_k d_{k-2}^{(k)}] \quad (k = 1, 2, \dots, n); \\ x'_{k0} &= \frac{1}{d_k^{(k)}} [i_k d_{k-1}^{(k)} - c_k^{(k)}] \quad (k = 1, 2, \dots, n); \\ d_{(k-1)0} &= \frac{i_k - i_{k-1}}{d_k^{(k)}} \left\{ d_{k-1}^{(k)} - \frac{i_k - i_{k-1}}{f_k^2} [c_{k-2}^{(k)} + \right. \\ &\quad \left. + x'_{k0} d_{k-2}^{(k)} - i_k d_{k-3}^{(k)}] \right\} \quad (k = 2, 3, \dots, n). \end{aligned} \quad (88)$$

Очевидно, что для вычисления всех параметров системы переменного увеличения по формулам (88) необходимо иметь выражения коэффициентов  $c_k^{(k)}$ ,  $c_{k-1}^{(k)}$ ,  $c_{k-2}^{(k)}$  и  $d_k^{(k)}$ ,  $d_{k-1}^{(k)}$ ,  $d_{k-2}^{(k)}$ ,  $d_{k-3}^{(k)}$  через коэффициенты  $c_k^{(n+1)}$  и  $d_k^{(n+1)}$ .

Найдем выражение коэффициента  $d_k^{(n)}$  через  $c_k^{(n+1)}$  и  $d_k^{(n+1)}$ . Из формулы (78) можно записать

$$d_k^{(n)} = -\frac{a_k^{(n+1)}}{f_{n+1}^2} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n). \quad (89)$$

Из формулы (80) находим выражение  $a_k^{(n+1)}$  и подставляем в (89):

$$d_k^{(n)} = -\frac{1}{f_{n+1}^2} [c_k^{(n+1)} + x'_{(n+1)0} d_k^{(n+1)} - i_{n+1} d_{k-1}^{(n+1)}] \quad (90)$$

$(k = 0, 1, 2, \dots, n);$

$$d_n^{(n)} = -\frac{d_{n+1}^{(n+1)}}{i_{n+1} - i_n}.$$

Для коэффициентов  $d_0^{(k)}$  и  $d_k^{(k)}$  можно получить общие выражения:

$$d_0^{(k)} = (-1)^{n-k} \frac{x'_{n0} x'_{(n-1)0} \dots x'_{(k+1)0}}{f_n^2 f_{n-1}^2 \dots f_{(k+1)0}^2} d_0^{(n)}$$

$(k = 1, 2, \dots, n-1);$

$$d_k^{(k)} = (-1)^{n-k} \frac{d_n^{(n)}}{(i_n - i_{n-1})(i_{n-1} - i_{n-2}) \dots (i_{k+1} - i_k)} \quad (k = 1, 2, \dots, n-1).$$

Для  $c_k^{(n)}$  [аналогично (80) для  $n$ -компонентной панкратической системы] можно записать следующие формулы:

$$\left. \begin{aligned} c_k^{(n)} &= a_k^{(n)} - x'_{n0} d_k^{(n)} + i_n d_{k-1}^{(n)} \quad (k = 1, 2, \dots, n-1); \\ c_n^{(n)} &= i_n d_{n-1}^{(n)} - x'_{n0} d_n^{(n)}; \\ c_{n+1}^{(n)} &= i_n d_n^{(n)}. \end{aligned} \right\} \quad (91)$$

Значения коэффициентов  $d_k^{(n)}$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, n$ ), входящих в формулы (91), находят из выражения (90).

Коэффициенты  $a_k^{(n)}$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, n-1$ ) определяют из формулы (78):

$$a_k^{(n)} = d_k^{(n+1)} + d_{n0} d_k^{(n)} + (i_{n+1} - i_n) d_{k-1}^{(n)}. \quad (92)$$

Подставив (92) в (91), получим выражение для коэффициента  $c_k^{(n)}$  в таком виде:

$$c_k^{(n)} = d_k^{(n+1)} + \frac{f_{n+1}^2}{x'_{(n+1)0}} d_k^{(n)} + i_{n+1} d_{k-1}^{(n)} \quad (k = 1, 2, \dots, n-1). \quad (93)$$

В формулы (93) входит величина  $x'_{n0}$ , которую необходимо определить, для того чтобы можно было вычислить коэффициенты  $c_k^{(n)}$ .

Из формулы (77)

$$x'_{n0} = \frac{a_0^{(n)}}{d_0^{(n)}}. \quad (94)$$

Подставляя в (94) значения коэффициентов  $a_0^{(n)}$  и  $d_0^{(n)}$ , найденные по формулам (78) и (90), получаем формулу, позволяющую вычислить величину  $x'_{n0}$ :

$$x'_{n0} = d_{n0} - \frac{f_{n+1}^2}{x'_{(n+1)0}}.$$

Эту формулу легко получить и по формуле Ньютона, примененной к последнему компоненту. Зная  $x_{n0}$ , по формулам (91) и (93) можно вычислить все коэффициенты  $d_k^{(n)}$  и  $c_k^{(n)}$ , а следовательно, и величины  $f_n^2$  и  $d_{(n-1)0}$ .

Таким образом, все параметры панкратической системы для заданных значений коэффициентов  $c_{k0}^{(n+1)}$  и  $d_k^{(n+1)}$  можно рассчитать по следующим формулам:

$$\begin{aligned} x'_{k0} &= \frac{1}{d_k^{(k)}} [i_k d_{k-1}^{(k)} - c_k^{(k)}] \quad (k = 1, 2, \dots, n+1); \\ f_k^2 &= \frac{i_k - i_{k-1}}{d_k^{(k)}} [c_{k-1}^{(k)} + x'_{k0} d_{k-1}^{(k)} - i_k d_{k-2}^{(k)}] \quad (k = 1, 2, \dots, n+1); \\ d_{(k-1)0} &= \frac{i_k - i_{k-1}}{d_k^{(k)}} \left\{ d_{k-1}^{(k)} - \frac{i_k - i_{k-1}}{f_k^2} [c_{k-2}^{(k)} + x'_{k0} d_{k-2}^{(k)} - i_k d_{k-3}^{(k)}] \right\} \\ &\quad (k = 1, 2, \dots, n); \\ x'_{k0} &= d_{k0} - \frac{f_{k+1}^2}{x'_{(k+1)0}} \quad (k = 1, 2, \dots, n); \\ d_k^{(m)} &= -\frac{1}{f_{m+1}^2} [c_k^{(m+1)} + x'_{(m+1)0} d_k^{(m+1)} - i_{m+1} d_{k-1}^{(m+1)}] \quad (95) \\ &\quad (k = 0, 1, 2, \dots, n); \\ &\quad (m = 1, 2, 3, \dots, n); \\ c_k^{(m)} &= d_k^{(m+1)} + \frac{f_{m+1}^2}{x'_{(m+1)0}} d_k^{(m)} + i_{m+1} d_{k-1}^{(m)}; \\ &\quad (k = 1, 2, \dots, n-1); \\ &\quad (m = 1, 2, \dots, n-1, n); \end{aligned}$$

$$c_n^{(n)} = i_n d_{n-1}^{(n)} - x_{n0}' d_n^{(n)};$$

$$c_{n+1}^{(n)} = i_n d_n^{(n)}.$$

Выведем формулу для увеличения  $(n+1)$ -компонентной панкреатической системы. Как известно [2],

$$\beta = (-1)^{n+1} \frac{f_1 f_2 \cdot \cdot \cdot f_{n+1}}{x_1 x_2 \cdot \cdot \cdot x_{n+1}} = \frac{x_1' x_2' \cdot \cdot \cdot x_{n+1}'}{f_1 f_2 \cdot \cdot \cdot f_{n+1}}. \quad (96)$$

Найдем выражение для  $x_1', x_2', \dots, x_{n+1}'$ :

$$x_1' x_2' \cdot \cdot \cdot x_{n+1}' = \left[ -\frac{f_1^2}{\sum_{k=0}^1 b_k^{(1)} m^k} \right] \left[ -\frac{f_2^2 \sum_{k=0}^1 b_k^{(1)} m^k}{\sum_{k=0}^2 b_k^{(2)} m^k} \right] \times \cdot \cdot \cdot \times$$

$$\times \left[ -\frac{f_n^2 \sum_{k=0}^{n-1} b_k^{(n-1)} m^k}{\sum_{k=0}^n b_k^{(n)} m^k} \right] \left[ -\frac{f_{n+1}^2 \sum_{k=0}^n b_k^{(n)} m^k}{\sum_{k=0}^{n+1} b_k^{(n+1)} m^k} \right] =$$

$$= (-1)^{n+1} \frac{f_1^2 f_2^2 \cdot \cdot \cdot f_{n+1}^2}{\sum_{k=0}^{n+1} d_k^{(n+1)} m^k}. \quad (97)$$

Подставляя в (96) значение  $x_1', x_2' \cdot \cdot \cdot x_{n+1}'$  из (97), получаем

$$\beta = (-1)^{n+1} \frac{f_1 f_2 \cdot \cdot \cdot f_{n+1}}{\sum_{k=0}^{n+1} d_k^{(n+1)} m^k}. \quad (98)$$

Из формулы (98) можно получить условия обеспечения заданного перепада увеличения системы.

Назовем перепадом увеличений отношение  $M = \frac{\beta(m_2)}{\beta(m_1)}$ , где  $m_1 \leq m \leq m_2$ , т. е.  $m_1$  и  $m_2$  — крайние значения изменения параметра  $m$ .

Из (94) находим

$$M = \frac{\sum_{k=0}^{n+1} d_k^{(n+1)} m_1^k}{\sum_{k=0}^{n+1} d_k^{(n+1)} m_2^k}.$$

Считаем, что  $\sum_{k=0}^{n+1} d_k^{(n+1)} m^k \neq 0$  на интервале  $m_1 \leq m \leq m_2$ .

Обозначим  $\sum_{k=0}^{n+1} d_k^{(n+1)} m_2^k = \delta$ ; тогда  $\sum_{k=0}^{n+1} d_k^{(n+1)} m_1^k = M\delta$ . Отсюда имеем два уравнения:

$$\begin{cases} (1-M)\delta = \sum_{k=0}^{n+1} d_k^{(n+1)} (m_2^k - m_1^k); \\ (1+M)\delta = \sum_{k=0}^{n+1} d_k^{(n+1)} (m_2^k + m_1^k). \end{cases} \quad (99)$$

Для  $m_2 = -m_1$  пропадают члены с четными степенями  $m$  в первом выражении и с нечетными степенями во втором выражении.

Для  $m_2 = -m_1 = 1$  уравнения (99) упрощаются:

$$\begin{cases} (1-M)\delta = 2 \sum_{k=1}^{n+1} d_k^{(n+1)} & (k - \text{нечетные целые числа}); \\ (1+M)\delta = 2 \sum_{k=0}^{n+1} d_k^{(n+1)} & (k - \text{четные целые числа}). \end{cases}$$

Из условий (99) перепада увеличений  $M$  можно получить и условие обеспечения заданного максимального значения смещения плоскости изображения  $\max |\Delta_{n+1}|$ . Если в выражении (79) числитель выбирать в форме полинома Чебышева, наименьшее уклоняющегося от нуля в интервале  $-m_2 \leq m \leq m_2$ , то тогда будет известно максимальное его значение, и оно обязательно будет на границе изменения  $m$ . Задавая нужное значение  $\delta$ , мы получаем максимальное значение величины  $\Delta_{n+1}$ , также на границе изменения  $m$ , отвечающее условию  $|\Delta_{n+1}(m)| \leq \max |\Delta_{n+1}|$ .

Таким образом, выполнение условий (99) одновременно обеспечивает заданный перепад увеличений  $M$  и заданное максимальное значение величины смещения плоскости изображения  $\max |\Delta_{n+1}|$ .

Рассматриваемые  $n$ -компонентные панкратические системы обладают некоторыми интересными общими свойствами. Остановимся подробнее на этих свойствах.

Покажем, что если в выражении (79) знаки коэффициентов  $c_k^{(n+1)}$  ( $k = n+1, n-1, n-3, \dots$ ) и  $d_k^{(n+1)}$  ( $k = n, n-2, n-4, \dots$ ) изменить на обратные, то при расчете параметров системы будем иметь следующее: 1) величины  $f_k^2$  ( $k=1, 2, \dots, n+1$ ) не изменятся, т. е. будут такими же, как и для коэффициентов выражения (79); 2) величины  $d_{k0}$ ,  $x_{k0}$ ,  $x_{k0}$  ( $k=1, 2, \dots, n+1$ ) численно не изменятся, но поменяют знаки на обратные.

Из выражения (95) следует, что величины  $x'_{(n+1)_0}$  и  $d_{n0}$  меняют знак на обратный при изменении знаков у коэффициентов  $d_n^{(n+1)}$  и  $c_{n+1}^{(n+1)}$ , величина  $f_{n+1}^2$  остается без изменений.



Проследим, как меняются коэффициенты  $d_k^{(n)}$  ( $k=0, 1, \dots, n$ ) и  $c_k^{(n)}$  ( $k=1, 2, \dots, n+1$ ). Очевидно, что коэффициенты  $d_k^{(n)}$  при  $k=n, n-2, n-4$  и  $c_k^{(n)}$  ( $k=n+1, n-1, n-3, \dots$ ) остаются без изменения, а знаки коэффициентов  $d_k^{(n)}$  ( $k=n-1, n-3, n-5, \dots$ ) и  $c_k^{(n)}$  ( $k=n, n-2, n-4, \dots$ ) меняются на обратные. Следовательно, и знаки величин  $x_{k0}$ ,  $d_{(k=1)0}$ ,  $x_{k0}$  ( $k=n, n-1, n-2, \dots, 1$ ) меняются на противоположные.

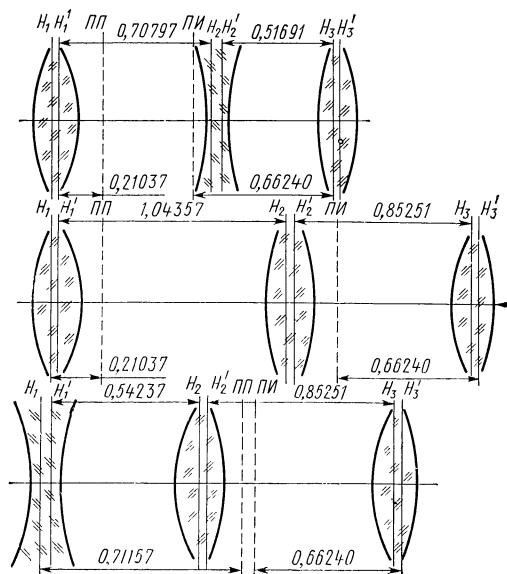


Рис. 43. Схемы панкратических систем

Изменение знаков коэффициентов  $c_k^{(n+1)}$  ( $k=n+1, n-1, n-3, \dots$ ),  $d_k^{(n+1)}$  ( $k=n, n-2, n-4$ ) на обратные в выражении (79) влечет за собой следующее: 1) максимальное смещение плоскости изображения  $\Delta_{\max} = \max|\Delta|$  не изменяется; 2) интервал увеличений не изменяется,  $M_1=1/M$ ; 3) график функции  $\Delta=\Delta(m)$  при новых коэффициентах повернется на  $180^\circ$ , т.е. займет положение, симметричное относительно начала координат, а график функции  $\beta=\beta(m)$  будет симметричен относительно оси  $\Delta$  при четном  $n$  и симметричен относительно начала координат для нечетного  $n$ .

Таким образом, рассчитав параметры систем переменного увеличения для коэффициентов  $d_k^{(n+1)}$  ( $k=0, 1, \dots, n+1$ ) и  $c_k^{(n+1)}$  ( $k=1, 2, \dots, n+2$ ) выражения (79), можно сразу же получить параметры системы и для коэффициентов  $c_k^{(n+1)}$  ( $k=n+1, n-1, \dots$ ) и

$n$	$d_k^{(n)}$	$c_k^{(n)}$
4	$d_0^{(4)} = -\frac{1}{f_5^2} [x'_{50} d_0^{(5)}]$	$c_0^{(4)} = 0$
	$d_1^{(4)} = -\frac{1}{f_5^2} [c_1^{(5)} + x'_{50} d_1^{(5)} - i_5 d_0^{(5)}]$	$c_1^{(4)} = d_1^{(5)} + \frac{f_5^2}{x'_{50}} d_1^{(4)} + i_5 d_0^{(4)}$
	$d_2^{(4)} = -\frac{1}{f_5^2} [c_2^{(5)} + x'_{50} d_2^{(5)} - i_5 d_1^{(5)}]$	$c_2^{(4)} = d_2^{(5)} + \frac{f_5^2}{x'_{50}} d_2^{(4)} + i_5 d_1^{(4)}$
	$d_3^{(4)} = -\frac{1}{f_5^2} [c_3^{(5)} + x'_{50} d_3^{(5)} - i_5 d_2^{(5)}]$	$c_3^{(4)} = d_3^{(5)} + \frac{f_5^2}{x'_{50}} d_3^{(4)} + i_5 d_2^{(4)}$
	$d_4^{(4)} = -\frac{1}{f_5^2} [c_4^{(5)} + x'_{50} d_4^{(5)} - i_5 d_3^{(5)}]$	$c_4^{(4)} = i_4 d_3^{(4)} - x'_{40} d_4^{(4)}$  $c_5^{(4)} = i_4 d_4^{(4)}$
3	$d_0^{(3)} = -\frac{1}{f_4^2} [x'_{40} d_0^{(4)}]$	$c_0^{(3)} = 0$
	$d_1^{(3)} = -\frac{1}{f_4^2} [c_1^{(4)} + x'_{40} d_1^{(4)} - i_4 d_0^{(4)}]$	$c_1^{(3)} = d_1^{(4)} + \frac{f_4^2}{x'_{40}} d_1^{(3)} + i_4 d_0^{(3)}$
	$d_2^{(3)} = -\frac{1}{f_4^2} [c_2^{(4)} + x'_{40} d_2^{(4)} - i_4 d_1^{(4)}]$	$c_2^{(3)} = d_2^{(4)} + \frac{f_4^2}{x'_{40}} d_2^{(3)} + i_4 d_1^{(3)}$

$n$	$d_k^{(n)}$	$d_k^{(n)}$
3	$d_3^{(3)} = -\frac{1}{f_4^2} [c_3^{(4)} + x'_{40}d_3^{(4)} - i_4d_2^{(4)}]$	$c_3^{(3)} = i_3d_2^{(3)} - x'_{30}d_3^{(3)}$  $c_4^{(3)} = i_3d_3^{(3)}$
2	$d_0^{(2)} = -\frac{1}{f_3^2} x'_{30}d_0^{(3)}$ $d_1^{(2)} = -\frac{1}{f_3^2} [c_1^{(3)} + x'_{30}d_1^{(3)} - i_3d_0^{(3)}]$ $d_2^{(2)} = -\frac{1}{f_3^2} [c_2^{(3)} + x'_{30}d_2^{(3)} - i_3d_1^{(3)}]$	$c_0^{(2)} = 0$ $c_1^{(2)} = d_1^{(3)} + \frac{f_3^{(2)}}{x'_{30}} d_1^{(2)} + i_3d_0^{(2)}$ $c_2^{(2)} = i_2d_1^{(2)} - x'_{20}d_2^{(2)}$  $c_3^{(2)} = i_2d_2^{(2)}$
1	$d_0^{(1)} = -\frac{1}{f_2^2} x'_{20}d_0^{(2)}$ $d_1^{(1)} = -\frac{1}{f_2^2} [c_1^{(2)} + x'_{20}d_1^{(2)} - i_2d_0^{(2)}]$	$c_0^{(1)} = 0$ $c_1^{(1)} = i_1d_0^{(1)} - x'_{10}d_1^{(1)}$  $c_2^{(1)} = i_1d_1^{(1)}$

$d_k^{(n+1)}$  ( $k=n, n-2, n-4, \dots$ ), имеющих обратные знаки. В новой системе будут сохранены значения  $\max|\Delta_{n+1}|$ ,  $M$ ,  $\max|\beta|$ .

В табл. 12 приведены выражения коэффициентов  $d_k^{(n)}$  и  $c_k^{(n)}$  для ( $k=0, 1, 2, 3, 4$ ;  $n=1, 2, 3, 4$ ) через коэффициенты  $d_k^{(n+1)}$  и  $c_k^{(n+1)}$ .

Для примера рассчитаем параметры трехкомпонентной панкратической системы с подвижными предметной плоскостью ( $i_0=0,5$ ), первым ( $i_1=1$ ) и третьим ( $i_3=1$ ) компонентами, перепад увеличений которой  $M=0,1$  [ $\delta=50$ ,  $-1/2 \leq m \leq 1/2$ ]. Возьмем следующие значения коэффициентов  $c_k^{(3)}$  и  $d_k^{(3)}$ :  $c_0^{(3)}=0$ ;  $c_1^{(3)}=-0,05$ ;  $c_2^{(3)}=-0,25$ ;  $c_3^{(3)}=0,2$ ;  $c_4^{(3)}=1$ ;  $d_0^{(3)}=20$ ;  $d_1^{(3)}=44,75$ ;  $d_2^{(3)}=30$ ;  $d_3^{(3)}=1$ . Коэффициенты  $c_k^{(2)}$ ,  $c_k^{(1)}$  и  $d_k^{(2)}$ ,  $d_k^{(1)}$ , рассчитанные по формулам табл. 12, приведены в табл. 13.

Т а б л и ц а 13

$d_0^{(2)}$	$d_1^{(2)}$	$d_2^{(2)}$	$c_1^{(2)}$	$c_2^{(2)}$	$c_3^{(2)}$
-0,702002	-1,54711	-1	-0,02918	-0,03704	0
$d_0^{(1)}$	$d_1^{(1)}$	—	$c_1^{(1)}$	$c_2^{(1)}$	—
-0,92194	-1	—	-0,78520	-1	—

По формулам (88) рассчитаем параметры системы:  $x'_{30}=29,8$ ;  $f_3^2=849$ ;  $d_{20}=28,45289$ ;  $f_2^2=0,028223$ ;  $x_{10}=-0,46097$ ;  $d_{10}=-0,62517$ ;  $f_1^2=0,062815$ ;  $|\beta|=0,49 \div 0,049$ .

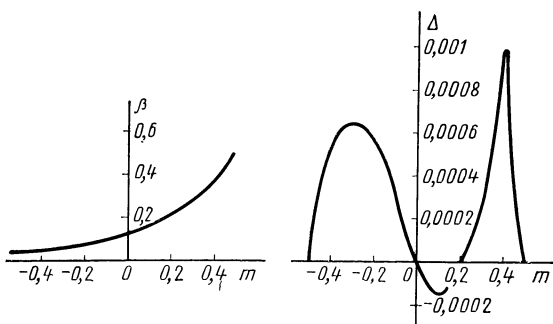


Рис. 44. Графики  $\Delta(m)$  и  $\beta(m)$

Поменяв знаки на обратные параметров  $x'_{30}$ ,  $d_{10}$ ,  $d_{20}$ ,  $x_{10}$  данной системы, можно построить системы переменного увеличения, схемы которых представлены на рис. 43. График смещения плоскости изображения и увеличения  $\beta$  приведен на рис. 44. Максимальное смещение плоскости изображения в данных системах  $\max|\Delta|=0,0005$  (0,05% величины перемещения первого и третьего компонентов системы).

## Компенсация смещения плоскости изображения

Смещение плоскости изображения  $\Delta$  можно полностью компенсировать, сделав одно из передаточных отношений  $i_k$  ( $k=0, 1, 2, \dots, n$ ) переменным. Зависимость передаточного отношения  $i_k$  от параметра  $m$  находится из условия  $\sum_{k=1}^{n+1} c_k^{(n)} m^k = 0$ . Если при расчете

параметров панкратической системы в качестве числителя выражения (79) использовался полином Чебышева, наименее уклоняющийся от нуля, то значение  $\max|\Delta|$  можно еще уменьшить следующим образом. Не меняя выражения (79) для  $\Delta(m)$ , можно найти выражение для числителя, при котором дробь, определяющая  $\Delta(m)$ , будет дробью Чебышева, наименее уклоняющейся от нуля [43]. Как показали числовые расчеты, таким образом для двух- и трехкомпонентных систем величину  $\max|\Delta|$  можно уменьшить в 2—3 раза.

Полученные формулы позволяют определить все параметры  $n$ -компонентной панкратической системы для заданных значений коэффициентов  $c_k^{(n)}$  и  $d_k^{(n)}$  в формуле смещения плоскости изображения  $\Delta$ .

Еще раз хотелось бы подчеркнуть следующее. Изложенный в настоящем параграфе метод расчета гауссовых элементов  $n$ -компонентных панкратических систем универсален, прост и пригоден для расчета панкратических систем общего вида с линейной связью между перемещениями компонентов, частным случаем которых являются системы, исследованные Бергстейном [51]. Как показывают результаты расчетов, наиболее перспективными с точки зрения получения больших перепадов увеличений  $M$  и меньших смещений плоскости изображения  $\Delta_{\max}$  являются панкратические системы с линейной связью между перемещениями компонентов при передаточных отношениях  $i$ , меньших единицы. Рекуррентные формулы (95) просты и удобны для использования при расчете на ЭЦВМ.

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПАНКРАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### 1. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЦВМ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАНКРАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Расчет гауссовых параметров панкратических систем, их анализ и выбор исходной системы для дальнейших исследований возможностей создания заданной панкратической системы сопряжены с большим объемом трудоемких вычислений. Поэтому рационально для сокращения времени и получения лучших результатов при этих расчетах прибегнуть к помощи ЭЦВМ. Использование ЭЦВМ позволяет также накопить обширный материал в виде таблиц параметров панкратических систем различного типа (линзовых, зеркальных и зеркально-линзовых) и назначения, имеющих перепад увеличений  $M$  в широком диапазоне ( $M=3\div 100$ ), и с заданным значением величины  $\Delta_{\max}$ , характеризующей максимальное смещение плоскости изображения при линейном законе перемещения компонентов, определяемом передаточными отношениями  $i_k = \mp 0,1 \div \mp 1,0$ .

Автоматический способ определения гауссовых элементов трехкомпонентных и пятикомпонентных панкратических оборачивающих систем с линейным законом перемещения компонентов описан в литературе [33, 34]. Однако следует отметить, что в работе [33] рассматриваются только оборачивающие системы с  $i_0 = i_2 = 0$ ,  $i_1 = i_3 = 1$ , т. е. один частный случай систем, рассмотренных в п. 4 и 5 гл. 1. В основу автоматического расчета положен способ определения параксиальных элементов панкратических систем, предложенный Бергстейном [51—54]. Однако этот способ имеет некоторые недостатки, которые значительно снижают эффективность его применения. Он пригоден только для расчета систем с  $i_1 = i_3 = i_5 = \dots = i_n = 1$  и  $i_2 = i_4 = \dots = i_{n-1} = 0$ , весьма трудоемок уже для расчета трехкомпонентных систем [33] и применим только для линзовых систем. Поэтому рациональнее при расчете параксиальных элементов панкратических систем использовать методы расчета, предлагаемые автором, которые позволяют рассчитывать параметры панкратических систем любого типа (линзовых, зеркальных и зеркально-линзовых) с любыми передаточными отношениями ( $i_k \neq \pm 1$  и  $i_k = \pm 1$ ) для заданных значений максимального смещения плоскости изображения  $\Delta_{\max}$ , характеризуемого величиной  $\delta$ . Причем формулы для расчета по этой методике весьма просты и удобны для использования ЭЦВМ даже для  $n$ -компонентных систем [рекуррентные соотношения (95)] [18].

При автоматическом методе определения параметров панкратических систем с линейной связью между перемещениями компонентов предполагается автоматическое определение гауссовых элементов

этих систем, автоматический выбор систем по оптимальным параметрам с точки зрения их практической реализации и автоматический отбор систем наименьшей длины.

Первым этапом расчета панкратической системы является ее габаритный расчет, в результате которого должны быть выбраны гауссовы элементы систем, таким образом, чтобы при заданных значениях передаточных отношений  $i_k$ , величины перепада увеличений  $M$  и смещения плоскости изображения  $\Delta_{\max}$  она имела наименьшие габаритные размеры и удовлетворяла требованию практической реализации.

Само по себе определение гауссовых элементов панкратических систем без применения электронной вычислительной машины требует большой затраты времени и труда, не говоря уже о выборе оптимальных систем, пригодных к реализации. Для программирования и автоматического расчета параксиальных элементов панкратических систем используется методика расчета, рассмотренная в пп. 2—5 гл. 1. Данная методика расчета положена в основу программ, составленных для двух ЭЦВМ «Урал-2» (на языке машины) и «Минск-22» (в автокоде для расчета параметров панкратических систем)<sup>1</sup>.

Эти программы позволяют определить параксиальные элементы панкратических систем любого типа с любым передаточным отношением, перепадом увеличений и заданным смещением плоскости изображения при условии, что компоненты системы — бесконечно тонкие элементы, т.е. их толщины малы по сравнению с фокусными расстояниями. Плоскости предмета и изображения могут иметь любое расположение.

Программы автоматического определения гауссовых элементов двухкомпонентных и трехкомпонентных панкратических систем могут быть использованы для решения следующих задач: 1) определения параметров всех теоретически возможных панкратических систем с заданными значениями передаточных отношений  $i_k$ , перепадов увеличений  $M$  и смещения плоскости изображения  $\Delta_{\max}$  с целью исследования параметров и возможных областей построения линзовых, зеркальных и зеркально-линзовых систем; 2) выбора реально осуществимых систем; 3) отыскания (среди реально осуществимых) систем наименьшей длины.

Программы составлены в общем виде и могут быть использованы для расчета любой двухкомпонентной или трехкомпонентной панкратической системы с линейной связью между перемещениями компонентов, изменение увеличения которой в заданном диапазоне достигается за счет перемещения предметной плоскости и каждого из компонентов системы.

Для выполнения расчетов должны быть заданы следующие величины: 1) кратность изменения увеличения  $M$ ; 2) максимально допустимое значение смещения плоскости изображения  $\Delta_{\max}$ , характеризующего параметром  $\delta$ ; 3) диапазон изменения передаточных отношений  $i_k$ ; 4) значение коэффициентов  $c_k^{(n)}$ , характеризующих числитель в выражении для  $\Delta$  [(24) или (52)]; 5) если нужно, чтобы система имела заданную (например, наименьшую) длину, следует задать соответствующее значение длины системы  $L$ .

В качестве коэффициентов числителя в (24) и (52) могут быть

---

<sup>1</sup> Программы составлены канд. техн. наук А. В. Шикуть.

Таблица 14

$n$	Многочлен Чебышева $P_n(x)$ с нулевой точкой, наименее уклоняющийся от нуля в промежутке $[0; +1]$	Наибольшее уклонение от нуля в промежутке $[0; +1]$	Точки наибольшего уклонения $x_i$	Корни $x_k$
2	$x^2 - 0,8284x$	0,1716	0,4142; 1	0; 0,8284
3	$x^3 - 1,3923x^2 + 0,4308x$	0,0385	0,1961; 0,7320; 1	0; 0,4641; 0,9282
4	$x^4 - 1,9209x^3 + 1,1135x^2 - 0,1835x$	0,0091	0,1127; 0,4802; 0,8478; 1	0; 0,2813; 0,6791; 0,9604
5	$x^5 - 2,4373x^4 + 2,0477x^3 - 0,6781x^2 + 0,0698x$	0,0022	0,0728; 0,3291; 0,6458; 0,9021; 1	0; 0,1862; 0,7887; 0,4875; 0,9749
6	$x^6 - 2,9481x^5 + 3,2329x^4 - 1,6094x^3 + 0,3497x^2 - 0,0245x$	0,0006	0,0508; 0,2370; 0,7457; 0,9319; 1 0,4913	0; 0,1316; 0,3597; 0,6230; 0,8510; 0,9827
7	$x^7 - 3,4557x^6 - 4,6687x^5 - 3,1030x^4 + 1,0426x^3 - 0,1610x^2 + 0,0085x$	0,0001	0,0374; 0,1780; 0,3810; 0,6063; 0,8093; 0,9498; 1	0; 0,0978; 0,2740; 0,4936; 0,7133; 0,8895; 0,9873
$n$	Многочлен Чебышева $P_n(x)$ , наименее уклоняющийся от нуля в промежутке $[-1; +1]$	Наибольшее уклонение от нуля в промежутке $[-1; +1]$	Точки наибольшего уклонения $x_i$	Корни $x_k$
2	$x^2 - 0,5000$	0,5000	0; $\pm 1$	$\pm 0,7071$
3	$x^3 - 0,7500x$	0,2500	$\pm 0,5000$ ; $\pm 1$	0; $\pm 0,8660$
4	$x^4 - 1,2500x^2 + 0,3125x$	0,1250	0; $\pm 0,7071$ ; $\pm 1$	$\pm 0,3827$ ; $\pm 0,9239$
5	$x^5 - 1,2500x^3 + 0,3125x$	0,0625	$\pm 0,3090$ ; $\pm 0,8090$ ; $\pm 1$	0; $\pm 0,5878$ ; $\pm 0,9511$
6	$x^6 - 1,500x^4 + 0,5625x^2 - 0,313$	0,0312	0; $\pm 0,5000$ ; $\pm 0,8660$ ; $\pm 1$	$\pm 0,2588$ ; $\pm 0,7071$ ; $\pm 0,9659$
7	$x^7 - 1,7500x^5 + 0,8750x^3 - 0,1094x$	0,0156	$\pm 0,2225$ ; $\pm 0,9100$ ; $\pm 1$ ; $\pm 0,6235$	$\pm 0,4339$ ; $\pm 0,7818$ ; $\pm 0,9749$



$n$	Многочлен $Q_n(x)$ , наименее уклоняющийся от нуля в промежутке $[-1; +1]$ при условии $Q_n(0)=0$	Наибольшее уклонение от нуля в промежутке $[-1; +1]$	Точки наибольшего уклонения $x_i$	Корни $x_k$
4	$x^4 - 0,8284x^2$	0,1716	$\pm 0,6436; \pm 1$	0; 0,9102
6	$x^6 - 1,3923x^4 + 0,4308x^2$	0,0385	$\pm 0,4429; \pm 0,8556; \pm 1$	0; $\pm 0,8613$

использованы коэффициенты многочленов Чебышева, наименее уклоняющихся от нуля; многочлены Чебышева с нулевой точкой, наименее уклоняющиеся от нуля в промежутке  $[0,1]$ , и др. (табл. 14).

Программа автоматического определения гауссовых элементов двухкомпонентных панкратических систем, автоматического выбора реально осуществимых систем и отбора из них систем наименьшей длины предусматривает нижеследующие операции.

1. Расчет параметров системы по формулам (25).

2. Оценка типа системы: а) линзовая ( $f_1^2 > 0; f_2^2 > 0; D > 0$ ); б) зеркальная ( $f_1^2 < 0; f_2^2 < 0; D < 0$ ); в) зеркально-линзовая с первым линзовым компонентом ( $f_1^2 > 0; f_2^2 < 0; D > 0$ ); г) зеркально-линзовая с первым зеркальным компонентом ( $f_1^2 < 0; f_2^2 > 0; D < 0$ ).

Если, например, окажется, что  $f_1^2 > 0$ ,  $f_2^2 > 0$  и  $D \geq 0$ , то машина классифицирует систему как линзовую и реально осуществимую и выдает на печать, если это нужно.

3. Оценка системы с точки зрения возможности ее построения; для этого выполняется оценка параметров  $|f^2| \geq 0,05$  и оценка расстояния между компонентами  $|D| \geq 0$  — для параксиальной оптики;  $|D| \geq 0,1$  — для реальных систем, чтобы компоненты могли соприкасаться в крайнем случае, но не находить один на другой.

Если же нужно выдать на печать только системы наименьшей длины, оценка системы продолжается далее.

4. Оценка системы по условию наименьшей длины. Если критерием оценки являются условия  $L_{\min} = D = 0$ ;  $d_k = f_k + f_{k+1}$ , программа предусматривает отбор только таких систем, у которых  $|d_x| < |d_k|$ ; системы, у которых  $|d_x| > |d_k|$ , отбрасываются.

Программа автоматического определения гауссовых элементов трехкомпонентных панкратических систем, автоматического выбора реально осуществимых систем и отбора из них систем наименьшей длины предусматривает нижеследующие операции.

1. Расчет параметров системы по формулам (54).

2. Оценка типа системы:

а) линзовая ( $f_1^2 > 0; f_2^2 > 0; f_3^2 > 0; D_1 > 0; D_2 > 0$ ); б) зеркальная ( $f_1^2 < 0; f_2^2 < 0; f_3^2 < 0; D_1 < 0; D_2 > 0$ ); в) зеркально-линзовая:

I вид —  $f_1^2 > 0$ ;  $f_2^2 > 0$ ;  $f_3^2 < 0$ ;  $D_1 > 0$ ;  $D_2 > 0$ ;

II вид —  $f_1^2 > 0$ ;  $f_2^2 < 0$ ;  $f_3^2 > 0$ ;  $D_1 > 0$ ;  $D_2 > 0$ ;

III вид —  $f_1^2 < 0$ ;  $f_2^2 > 0$ ;  $f_3^2 > 0$ ;  $D_1 < 0$ ;  $D_2 < 0$ ;

IV вид —  $f_1^2 < 0$ ;  $f_2^2 < 0$ ;  $f_3^2 > 0$ ;  $D_1 < 0$ ;  $D_2 < 0$ ;

V вид —  $f_1^2 > 0$ ;  $f_2^2 < 0$ ;  $f_3^2 < 0$ ;  $D_1 > 0$ ;  $D_2 > 0$ ;

VI вид —  $f_1^2 < 0$ ;  $f_2^2 > 0$ ;  $f_3^2 < 0$ ;  $D_1 < 0$ ;  $D_2 < 0$ .

Если, например, окажется, что  $f_1^2 > 0$ ;  $f_2^2 > 0$ ;  $f_3^2 < 0$ ;  $D_1 > 0$  и  $D_2 > 0$ , то машина классифицирует систему как зеркально-линзовую и реально осуществимую и при необходимости выдает на печать ее параметры.

3. Оценка с точки зрения возможности построения системы, для этого выполняются: а) оценка параметров  $|f^2| \geq 0,05$ ; б) оценка расстояния между компонентами  $|D| \geq 0$  — для параксиальной оптики;  $|D| \geq 0,1$  — для реальных систем, чтобы компоненты в крайнем случае могли соприкасаться, но не находить один на другой.

Если нужно выдать на печать только системы наименьшей длины, оценка системы производится далее.

4. Оценка системы по условию наименьшей длины. Если критерием оценки является условие  $L_{\min} = D_k + D_{k+1}$ , где  $D_k = f_k + f_{k+1}$ ;  $D_{k+1} = f_{k+1} - f_{k+2} + d_{k+1}$  или  $D_k = f'_k + d_k - f_{k+1}$ ;  $D_{k+1} = f_{k+1} + f_{k+2}$ , то программа предусматривает отбор только таких систем, у которых  $|D_x| \geq |D_k|$  и  $|D_{x+1}| \geq |D_{k+1}|$ ; системы, у которых  $|L_x| > |L_{\min}|$ , отбрасываются.

Для автоматического определения параметров симметричного типа трехкомпонентных систем наименьшей длины составлена программа для ЭЦВМ для случая  $c_3^{(3)} = c_1^{(3)} = 0$ ;  $c_2^{(3)} = -1$ ;  $-1 \leq m \leq 1$ . Расчеты проводятся по следующим формулам:

$$f_1^2 = \delta i (\delta i \omega^2 + \gamma); \quad x_0 = -\delta i \omega; \quad d_{20} = i d_{10}; \quad f_2 = \frac{\delta^2 i^2 M i}{f_1^4};$$

$$x'_{30} = -i x_0; \quad f_3^2 = i^2 f_1^2; \quad d_{10} = \frac{\frac{1+M}{2} + \delta i \omega \gamma}{\delta i \omega^2 + \gamma} + \delta i \omega,$$

где величина  $\delta$ , соответствующая системе наименьшей длины, определяется из решения уравнения (66).

Все параметры систем — линейные величины, участвующие в расчете, выражены в долях наибольшего значения параметра  $m$ , принятого за единицу, и даются в относительных величинах.

Следует отметить, что формулы, приведенные в п. 5 гл. 1, позволяют составить программу для определения гауссовых элементов  $n$ -компонентной панкратической системы. Расчеты могут быть проведены по рекуррентным формулам (95).

Для расчетов гауссовых параметров пяти- и четырехкомпонентных панкратических систем можно использовать формулы, приведенные в табл. 12.

## 2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПАНКРАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ЭЦВМ

### Двухкомпонентные системы

При использовании программ для автоматического определения параметров панкратических систем нами были исследованы двухкомпонентные системы со следующими характеристиками:

1)  $c_2^{(2)} = 0$ ;  $c_1^{(2)} = -1$ ;  $-1 \leq m \leq 1$  (смещение ПИ  $\Delta = 0$  при  $m = 0$  и  $m = \pm 1$ );  $-1 \leq i \leq 1$ ;  $M = 3 \div 15$ ;  $\delta = 5, 10, 15, 20$ ;

2)  $c_2^{(2)} = 0$ ;  $c_1^{(2)} = -\frac{1}{4}$ ;  $-\frac{1}{2} \leq m \leq \frac{1}{2}$  (смещение ПИ  $\Delta = 0$  при  $m = 0$ ;  $m = \pm \frac{1}{2}$ );  $-1 \leq i \leq 1$ ;  $M = 3-15$ ;  $\delta = 1, 3, 5, 10$ ;

3)  $c_2^{(2)} = -1,3923$ ;  $c_1^{(2)} = 0,4308$ ;  $m = 0 \div 1$  (полином Чебышева с нулевой точкой, наименее уклоняющийся от нуля в промежутке  $0-1$ );  $-1 \leq i \leq 1$ ;  $M = 3 \div 15$ ;  $\delta = 1, 3, 5, 10$ .

Во всех трех случаях при расчетах за исходную принималась панкратическая система с неподвижным первым компонентом ( $i_1 = 0$ ), перемещающимися предметной плоскостью и вторым компонентом ( $i = i_2/i_0$ ). Параметры производных систем могут быть получены из основной (см. табл. 2).

Использование свойств панкратических систем (см. п. 3 гл. 1) позволяет одновременно, не выполняя дополнительных вычислений, из каждой таблицы параметров двухкомпонентных панкратических систем составить еще три таблицы параметров систем, обладающих такими же перепадами увеличений и смещений ПИ, что и исходные системы.

Параметры некоторых линзовых систем ( $i_0 = 1$ ), представляющих с нашей точки зрения наибольший практический интерес, приведены в табл. 15.

Анализ результатов расчета позволяет сделать следующие выводы.

1. Построение зеркальных систем с указанными характеристиками (см. табл. 7,15) практически невозможно.

2. С ростом перепада увеличений  $M$  значения  $f_1^2$  убывают, а значения  $f_2^2$  возрастают. Так, например, при  $M = 3$  и  $c_2^{(2)} = -1,3923$ ;  $c_1^{(2)} = 0,4308$ ;  $\delta = 1$ ;  $i = 1$  фокусные расстояния  $f_1^2 = 0,1313$ ;  $f_2^2 = 2$ , а при  $M = 12$   $f_1^2 = 9,01026$ ;  $f_2^2 = 115,7232$ . Кроме того, с увеличением перепада  $M$  и  $\delta$  все меньше становится реально осуществимых систем и все меньше систем наименьшей длины.

3. С уменьшением передаточного отношения ( $|i| = 1 \div 0,1$ ) значение  $f_1^2$  возрастает, а  $f_2^2$  убывает.

4. Минимальные значения смещения ПИ в исследованных си-

Таблица 15

№ по пор.	$\delta$	$M$	$i_2$	$i_1$	$x'_{20}$	$f_2^2$	$x_0$	$d_0$	$f_1^2$	$\Delta_{\max}$	
$c_2^{(2)}=0; c_1^{(2)}=-1; -1 \leq m \leq 1$											
1	5	3	0,7	0	-2,45	2,5725	-4,0	0,35	5,6	-0,0474	
2			-1		5,0	35,0	-1,5714	-6,5714	0,6735	0,0392	
3		4	0,4	-1,2	0,64	-3	0	1,6	0,0425		
4		6	0,241	+1	0,73	1,464	1,9930	1,273	1,467	0,03545	
5		4	-1	0	-7,5	68,75	-1,4727	-8,9727	0,2856	0,0331	
6		7	0,2		-0,6	0,2	-1,8	-0,24	0,168	0,0321	
7		9	0,1		-0,2	0,165	-2	0	1,65	0,03536	
8		10	0,1	-1	-0,225	0,2543	-1,7027	-0,6020	0,8999	0,0308	
9		12			-0,275	0,4743	-1,4348	-1,4467	0,3992	0,0245	
10		15			-0,35	0,9075	-1,2727	-2,4500	0,1818	0,01875	
11	10	4	1	0	-15	200	-1,8	-13,2	0,24	0,0075	
12			-0,6	0,16	-3	0	0,8	0,0175			
13		0,2	-1	-0,6	1,76	-3	0	8,8	0,01753		
14		6	1	0	-25,0	590	-1,44068	-23,5593	0,586	0,0138	
15			-0,25	0,3025	-2,2727	-0,25	2,18196	0,0384			
16		10	0,1	-1	-0,45	1,6225	-1,37288	-3,4398	0,22748	0,01142	
17	15	6			-0,375	0,96932	-1,80851	-2,1356	0,81268	0,01093	
18	20	3	1	0	-20,0	360,0	-2,1666	-17,8333	0,36111	0,0075	
19			-0,2		-0,8	0,96	-1,5	-1,1	0,15	0,00964	
20		4	-0,2	0	-1,2	1,84	-1,43478	-1,48695	0,06654	0,00815	
21		5	0,1	-0,4	0,1	-2	-0,2	0,1	0,008959		
22		5	0,1	-0,4	0,5	-0,8	-1	0,2	0,0192		
$c_2^{(2)}=0; c_1^{(2)}=-0,25; -0,5 \leq m \leq +0,5$											
23	10	6	0,1	-1	0,15	0,132	-1	-0,55	0,33	0,022	
24		3			7	-0,18	0,2244	-0,83828	-1,0634	0,15819	
25		5			5	-0,2	0,275	-1	-1,1	0,275	0,01495
26		3			0,2	0	-0,8	0,48	-1,25	-0,55	0,0625

№ по пор	$\delta$	$M$	$i_2$	$i_1$	$x'_{20}$	$f_2^2$	$x_0$	$d_0$	$f_1^2$	$\Delta_{\max}$
$c_2^{(2)} = -1,3923; c_1^{(2)} = 0,4308; 0 \leq m < 1$										
27	1	4	0,5	0	-0,75	0,25	-1,5	0	0,5	0,0375
28	3		0,4		-0,80308	0,58521	-1,197642	-0,56943	0,31456	0,012
29	5	3			-1,44308	1,99509	-1,7355	-1,30562	0,1335	0,007
30	10		0,2		-0,72154	0,49877	-1,73596	-0,65281	0,066752	0,003

стемах, которые удалось получить<sup>1</sup>, следующие:  $M=3$ ,  $\Delta_{\max}=0,003$ ;  $M=6$ ,  $\Delta_{\max}=0,005$ ;  $M=10$ ,  $\Delta_{\max}=0,011$ ;  $M=12$ ,  $\Delta_{\max}=0,024$ ;  $M=15$ ,  $\Delta_{\max}=0,018$ .

5. Получение малых смещений плоскости изображения  $\Delta_{\max}$  связано с уменьшением фокусных расстояний  $f_1^2$  и с увеличением  $f_2^2$ , а также с уменьшением  $\beta_{\max} = \max|\beta|$ . Так, например, для  $c_2^{(2)}=0$ ;  $c_1^{(2)}=-1/4$ ;  $M=3$ ;  $i=1$  при  $\delta=1$   $f_1^2=1,1595$ ;  $f_2^2=2,2539$ , а при  $\delta=10$   $f_1^2=0,04103$ ;  $f_2^2=380$ .

6. Лучшие параметры (малые оптическую силу и длину) имеют во всех случаях системы с передаточным отношением  $i=0,1 \div 0,2$ . Длина систем, как правило, не превышает 2,2—2,3 (при  $-1 \leq m \leq 1$ ) и величин 1,1—1,2 (при  $-0,5 \leq m \leq 0,5$  и  $0 \leq m \leq 1$ ).

7. Панкратические системы, используемые в наблюдательных приборах, с перепадом увеличений  $M \leq 4-5$  следует практически всегда выполнять с линейной зависимостью между перемещениями компонентов, так как эти системы могут быть легко рассчитаны по разработанной методике или их можно выбрать из таблиц (см. табл. 7, 15) параметров рассчитанных систем при  $i < 1$  при перемещении ПИ, обеспечивающем диоптрийность до  $-2$  дптр.

В заключение следует отметить, что в последнее время наметилась тенденция [10, 33, 51] к уменьшению  $\Delta_{\max}$  и повышению  $M$  за счет увеличения числа компонентов панкратической системы при  $i=1$ . Однако расчеты и анализ двухкомпонентных панкратических систем с линейной связью между перемещениями компонентов показывают, что возможности этих систем еще не полностью исчерпаны. Использование передаточного отношения  $i < 1$  (с точки зрения кинематики это несущественное усложнение) приводит к тому, что можно построить системы, которые имеют такие же смещения плоскости изображения  $\Delta_{\max}$ , перепад увеличений  $M$  и длину, как и трехкомпонентные системы с  $i=1$  [27, 33]. Очевидно, что использование таких систем особенно рационально там, где требуется полу-

<sup>1</sup> Смещения плоскости изображения  $\Delta_{\max}$  в рассматриваемых системах могут быть уменьшены еще в 1,5—2 раза, если рассчитать параметры этих систем, представив  $\Delta$  в виде дроби Чебышева, наименее уклоняющейся от нуля.

чить простую конструкцию и большой перепад увеличений при относительно невысоких требованиях к качеству изображения (имитаторы, тренажеры и т. д.).

## Трехкомпонентные системы

Программа для автоматического определения параметров систем на ЭЦВМ использовалась нами для исследования и анализа возможностей построения трехкомпонентных панкратических систем, рассчитанных для случая  $c_3^{(3)} = c_1^{(3)} = 0$ ;  $c_2^{(3)} = -0,25$ ;  $-0,5 \leq m \leq 0,5$  (смещение ПИ  $\Delta = 0$  при  $m = 0$ ,  $m = 0,5$  и  $m = -0,5$ );  $-1 \leq i \leq 1$ ;  $M = 2 \div 10$ ,  $\delta = 1 \div 5, 10$ ;  $M = 0,1$ ,  $\delta = 10, 25, 50$  при  $-100 \leq d_2^{(3)} \leq 100$ .

За исходную при расчетах принималась система с неподвижной предметной плоскостью ( $i_0 = 0$ ) и вторым компонентом ( $i_2 = 0$ ) и  $i_1 = 1$ . Параметры всех производных систем могут быть получены из исходной с помощью табл. 8.

Расчеты проводились по формулам ( $-0,5 \leq m \leq 0,5$ ):

$$x'_{30} = d_2^{(3)} i_3^2; \quad f_3^2 = i_3^2 (d_2^{(3)2} i_3 - k); \quad x_0 + d_{10} = \frac{h - k d_2^{(3)} i_3}{d_2^{(3)2} i_3 - k};$$

$$f_3^2 = \frac{i_3 \left[ k i_3 \left( k^2 - 2 h d_2^{(3)} + \frac{d_2^{(3)2}}{4} \right) + h^2 - \frac{k^2}{4} \right]}{(d_2^{(3)2} i_3 - k)^2};$$

$$d_{20} = d_2^{(3)} i_3^2 + i_3 (x_0 + d_{10});$$

$$x_0 = - \frac{d_0^{(3)} (k^2 - h d_2^{(3)}) i_3}{h^2 - \frac{k^2}{4} + k i_3 \left( k^2 - 2 h d_2^{(3)} + \frac{d_2^{(3)2}}{4} \right)};$$

$$d_{10} = \frac{h - k d_2^{(3)} i_3}{d_2^{(3)2} i_3 - k} - x_0;$$

$$f_1^2 = \frac{d_0^{(3)} d_2^{(3)} i_3}{d_2^{(3)2} i_3 - k} - x_0 d_{10}; \quad h = \frac{d_2^{(3)}}{4} + d_0^{(3)} =$$

$$= \frac{(1 + M) \delta}{2}; \quad k = (1 - M) \delta.$$

Используя свойства трехкомпонентных панкратических систем, из каждой таблицы можно составить еще три таблицы параметров систем, которые будут иметь те же смещения ПИ и перепады увеличений, что и исходные системы.

Анализ результатов расчета на ЭЦВМ параметров трехкомпонентных панкратических систем позволяет сделать некоторые практически полезные выводы.

1. Величина максимального смещения плоскости изображения  $\Delta_{\max}$  в трехкомпонентных панкратических системах может быть уменьшена в 10—20 раз по сравнению с двухкомпонентными системами. Так, для панкратических систем с  $M=2\div 3$  получено  $\Delta_{\max}=0,00016$  (см. табл. 18), а с  $M=10$   $\Delta_{\max}=0,001\div 0,0005$  (см. табл. 16).

2. Наиболее короткофокусным является, как правило, второй компонент.

3. Уменьшение оптической силы компонентов (особенно второго) может быть достигнуто за счет введения перемещения по линейному закону второго компонента ( $i_2 \neq 0$ ).

4. Длина систем  $L_{\max}=1,5\div 2,5$ .

5. Максимальный перепад увеличений при малых смещениях  $M=10\div 20$ .

В табл. 16—18 приведены значения параметров панкратических систем, представляющих с нашей точки зрения практический интерес. Каждая из этих систем может послужить основой для создания новой системы с уменьшенной величиной смещения ПИ  $\Delta_{\max}$ , с заданным перепадом увеличений  $M$  и заданного типа (линзовой, зеркальной и зеркально-линзовой).

Покажем это на примере. Выберем из табл. 16 систему с перепадом увеличений  $M=0,1$ ,  $\delta=50$ ,  $d_0^{(3)}=30$ , максимальным смещением плоскости изображения  $\Delta_{\max} \approx 0,001$  и  $i_0=i_2=0$ ,  $i_1=i_3=1$ . Взяв за основу эту систему, ее можно трансформировать (изменить параметры системы) в систему, для которой максимальное смещение плоскости изображения  $\Delta_{\max}$  будет уменьшено в 1,5—2 раза. Например, если коэффициенты  $c_2^{(3)}$ ,  $c_1^{(3)}$  в выражении (52) ( $c_2^{(3)}=0$  и  $c_1^{(3)}=-0,25$ ) изменить и взять  $c_2^{(3)}=-0,25$ ,  $c_1^{(3)}=-0,05$  и пересчитать параметры системы при тех же значениях передаточных отношений и величины  $\delta$ , то в новой системе  $\Delta_{\max}$  будет уменьшено примерно в 2 раза ( $\Delta_{\max} \approx 0,0005$ ) [18]. Параметры исходной системы изменились мало, а смещение ПИ  $\Delta_{\max}$  уменьшилось значительно. Дальнейшая коррекция этой системы может быть проведена путем изменения коэффициента  $d_2^{(3)}$  и передаточного отношения  $i_3$  в некотором интервале с целью исследования их влияния на параметры системы. В табл. 19 приведены параметры ряда систем, у которых  $d_2^{(3)}$  изменяется в интервале  $28 \leq d_2^{(3)} \leq 32$ , при тех же значениях  $M$ ,  $\delta$ ,  $i_3$ , что и у исходной системы. Из табл. 19 видно, что, меняя величину  $d_2^{(3)}$ , можно получить ряд систем, в которых оптическая сила второго компонента может быть уменьшена примерно в 1,4 раза.

Покажем эффект от введения перемещения второго компонента ( $i_2 \neq 0$ ) при расчете параметров систем. Возьмем вторую систему с параметрами  $M=0,1$ ,  $\delta=50$ ,  $i_3=0,1$  и  $d_0^3=40$  (табл. 16). В этой системе  $i_2=0$ , и она практически не может быть использована (величина  $f_2$  очень мала). Однако введя перемещение второго компонента в этой системе, можно построить вполне реальную систему.

$\delta=50^\circ; M=0,1; -0,5 \leq m \leq 0,5; \Delta_{\max}=0,001-0,0015$							
$d_2^{(3)}$	$x'_{30}$	$f_3^2$	$f_2^2$	$d_{20}$	$x_0$	$d_{10}$	$f_1^2$
$i_3=0,1$							
30	0,3	0,045	0,1457	0,06111	-0,8135	-1,5763	0,0517
40	0,4	0,115	0,999546	0,2674	-1,282	-0,0439	0,5524
-50	-0,5	0,205	0,05842	-0,3768	-0,5539	1,7857	0,0136
-60	-0,6	0,315	0,02848	-0,5056	-0,5526	1,4971	0,01781
-70	-0,7	0,445	0,01626	-0,623	-0,552	1,3217	0,02173
-80	-0,8	0,595	0,01027	-0,7349	-0,5519	1,2032	0,02538
$i_3=0,2$							
30	1,2	1,08	0,062	0,8407	-0,85956	-0,9467	0,08458
40	1,6	2,2	0,00601	1,3582	-1,42308	0,2140	0,8136
-40	-1,6	2,2	0,1107	-1,3182	-0,5597	1,968	0,011
-50	-2	3,64	0,04719	-1,7901	-0,5568	1,6063	0,01525
-60	-2,4	5,4	0,0247	-2,2319	-0,55508	1,3958	0,01925
$i_3=0,3$							
30	2,7	6,075	0,0495	2,1967	-0,86229	-0,8155	0,0968
40	3,6	11,745	0,0052	3,2466	-1,47720	0,2990	0,9245
-50	-4,5	19,035	0,0442	-4,2011	-0,55776	1,5542	0,01581
-60	-5,4	27,945	0,0236	-5,1572	-0,55590	1,3651	0,01974
$i_3=0,4$							
20	3,2	7,36	0,5656	2,0435	-0,70988	-2,1814	0,01665
30	4,8	20,16	0,0445	4,1492	-0,86876	-0,7582	0,10319
40	6,4	38,08	0,0049	5,9345	-1,50580	0,3419	0,9855
-50	-8,0	61,12	0,0427	-7,6115	-0,65824	1,5294	0,01609
$i_3=0,5$							
20	5	19,375	0,4852	3,6371	-0,7118	-2,014	0,01805
30	7,5	50,625	0,0419	6,7006	-0,87275	-0,7260	0,1071
-50	-12,5	150,625	0,0419	-12,0218	-0,5585	1,5150	0,01626
-60	-15	219,375	0,0228	-14,607	-0,55655	1,3415	0,02013
$i_3=0,6$							
20	7,2	42,12	0,4406	5,6231	-0,71310	-1,9151	0,01899
30	10,8	106,92	0,0403	9,8515	-0,78540	-0,7054	0,1098
40	14,4	197,64	0,00453	13,709	-1,53558	0,3863	1,0507
-40	-14,4	197,64	0,0896	-13,673	-0,56196	1,7723	0,01233
-50	-18	314,28	0,0414	-17,432	-0,55872	1,5054	0,01637
-60	-21,6	456,84	0,0226	-21,1326	-0,55674	1,3357	0,02022
$i_3=0,7$							
20	9,8	80,605	0,4124	8,0053	-0,71393	-1,8498	0,01967
30	14,7	200,655	0,03917	13,6021	-0,87731	-0,6911	0,1116



$\delta=50; M=0,1; -0,5 \leq m \leq 0,5; \Delta_{\max}=0,001-0,0015$							
$d_2^{(3)}$	$x'_{30}$	$f_3^2$	$f_2^2$	$d_{20}$	$x_0$	$d_{10}$	$f_1^2$
40	19,6	368,725	0,00444	18,7974	-1,54427	0,3978	1,0701
-40	-19,6	368,725	0,0884	-18,7616	-0,56210	1,7598	0,01242
-50	-24,5	584,815	0,0410	-23,8421	-0,55888	1,4987	0,01645
-60	-29,4	848,925	0,0224	-28,8577	-0,55685	1,3316	0,02029
$i_3=0,8$							
20	12,8	140,8	0,3930	10,7855	-0,71464	-1,8035	0,02017
30	19,2	345,5	0,0384	17,9526	-0,86872	-0,6805	0,1131
40	25,6	632,32	0,00438	24,6850	-1,55088	0,4072	1,0849
-40	-25,6	632,32	0,0875	-24,6494	-0,56224	1,7505	0,01249
-50	-32	1000,96	0,0407	-31,2522	-0,55896	1,4937	0,01651
-60	-38,4	1451,51	0,0223	-37,7827	-0,55696	1,3285	0,02035
$i_3=0,9$							
20	16,2	229,635	0,3788	13,9643	-0,71523	-1,7689	0,02057
30	24,3	557,685	0,0378	22,9029	-0,87984	-0,6725	0,1142
40	32,4	1016,95	0,0043	31,3726	-1,55610	0,4145	1,0966
-40	-32,4	1016,95	0,0867	-31,3371	-0,58232	1,7433	0,01255
-50	-40,5	1607,44	0,0405	-39,6622	-0,55899	1,4899	0,01656
-60	-48,6	2329,15	0,0222	-47,9077	-0,55701	1,3262	0,02039
$i_3=1$							
20	20	355	0,368	17,5423	-0,7156	-1,7421	0,0209
30	30	855	0,0373	28,4532	-0,8807	-0,6660	0,1151
40	40	1555	0,00429	38,8601	-1,5602	0,4204	1,1060
-40	-40	1555	0,0862	-38,8248	-0,5624	1,7376	0,0126
-50	-50	2455	0,0404	-49,0723	-0,5591	1,4868	0,0166
-60	-60	3555	0,0222	-59,2328	-0,5571	1,3243	0,0204
$i_3=-0,1$							
10	0,1	0,055	0,2149	0,2318	-0,67308	-0,6451	-0,0203
20	0,2	0,085	0,0604	0,3382	-0,76074	-0,6216	0,0565
30	0,3	0,135	0,0134	0,4204	-0,97959	-0,2241	0,2249
-30	-0,3	0,135	0,0949	-0,3796	-0,57659	1,3729	0,01381
-40	-0,4	0,205	0,0489	-0,4744	-0,56991	1,3138	0,01705
-50	-0,5	0,295	0,0276	-0,5669	-0,56549	1,2350	0,02040
$i_3=-0,2$							
20	0,8	1	0,1149	1,132	-0,73956	-0,9204	0,03928
30	1,2	1,8	0,0203	1,4644	-0,93204	-0,3902	0,1697
40	1,6	2,92	0,0027	1,8123	-1,82394	0,7623	1,7740
-40	-1,6	2,92	0,0621	-1,7822	-0,56646	1,4774	0,015
-50	-2	4,36	0,0326	-2,1550	-0,56256	1,3378	0,01865
-60	-2,4	6,12	0,0191	-2,5340	-0,56006	1,2300	0,02221

$\delta=50; M=0,1; -0,5 \leq m \leq 0,5; \Delta_{\max}=0,001-0,0015$							
$d_2^{(3)}$	$x'_{30}$	$i_3^2$	$i_2^2$	$d_{20}$	$x_0$	$d_{10}$	$i_1^2$
$i_3=-0,3$							
20	1,8	4,455	1,4972	2,3409	-0,73275	-1,0703	0,03393
30	2,7	8,505	0,0237	3,119	-0,91719	-0,4558	0,1534
40	3,6	14,175	0,0030	3,9243	-1,74216	0,6612	1,5519
-40	-3,6	14,175	0,0677	-3,8929	-0,56532	1,5415	0,01432
-50	-4,5	21,465	0,0345	-4,7443	-0,56160	1,3761	0,01807
-60	-5,4	30,375	0,0199	-5,6087	-0,55923	1,2548	0,02171
$i_3=-0,4$							
20	3,2	13,12	0,1732	3,9561	-0,72940	-1,1608	0,03133
30	4,8	25,92	0,0257	5,3605	-0,90976	-0,4193	0,1455
40	6,4	43,84	0,0032	6,8365	-1,70396	0,6127	1,4528
-40	-6,4	43,84	0,0708	-6,8044	-0,56476	1,5757	0,01398
-50	-8	66,88	0,0355	-8,3340	-0,56112	1,3960	0,01779
-60	-9,6	95,04	0,0203	-9,8835	-0,55880	1,2676	0,02146
$i_3=-0,5$							
20	.5	30,625	0,19	5,9745	-0,7274	-1,2216	0,0298
30	7,5	61,875	0,02704	8,2096	-0,90565	-0,5135	0,1410
40	10	105,625	0,00336	10,5488	-1,6818	0,5842	1,3967
-40	-10	105,625	0,07269	-10,5163	-0,5644	1,5969	0,0138
-50	-12,5	161,875	0,03615	-12,9237	-0,5608	1,4083	0,0176
-60	-15	230,625	0,02054	-15,3584	-0,55655	1,2754	0,0213
$i_3=-0,6$							
20	7,2	61,56	0,2026	8,3947	-0,72606	-1,2652	0,02877
30	10,8	126,36	0,02796	11,6589	-0,90282	-0,5288	0,1379
40	14,4	217,08	0,00346	15,0612	-1,667382	0,5654	1,3607
-40	-14,4	217,08	0,07403	-15,0283	-0,56418	1,6115	0,01365
-50	-18	333,73	0,03659	-18,5136	-0,58064	1,4166	0,01750
-60	-21,6	476,28	0,02071	-22,0333	-0,57842	1,2806	0,02121
$i_3=-0,7$							
20	9,8	111,475	0,2123	11,2162	-0,72513	-1,2980	0,02805
30	14,7	231,525	0,02865	15,7085	-0,90083	-0,5399	0,1358
40	19,6	399,595	0,003526	20,3736	-1,45725	0,5521	1,3355
-40	-19,6	399,595	0,07501	-20,3406	-0,56406	1,6220	0,01355
-50	-24,5	615,685	0,0369	-25,1035	-0,56049	1,4226	0,01742
-60	-29,6	879,795	0,02084	-29,9083	-0,55825	1,2844	0,02114
$i_3=-0,8$							
20	12,8	186,88	0,2201	14,4384	-0,72440	-1,3235	0,02751
30	19,2	391,68	0,02919	20,3582	-0,89928	-0,5484	0,1343

$\delta=50; M=0,1; -0,5 \leq m \leq 0,5; \Delta_{\max}=0,001-0,0015$							
$d_2^{(3)}$	$x'_{30}$	$f_3^2$	$f_2^2$	$d_{20}$	$x_0$	$d_{10}$	$f_1^2$
40	25,6	678,4	0,003577	26,486	-1,64968	0,5421	1,3170
-40	-25,6	678,4	0,07576	-26,4528	-0,56392	1,6299	0,01348
-50	-32	1074,04	0,03714	-32,6934	-0,56040	1,4271	0,02736
-60	-38,4	1497,6	0,02093	-38,9832	-0,55816	1,2872	0,02109
$i_3=-0,9$							
20	16,2	295,245	0,2264	18,0611	-0,72387	-1,3440	0,02710
30	24,3	623,295	0,02961	25,6079	-0,89811	-0,6551	0,1330
40	32,4	1082,565	0,003617	33,3985	-1,64385	0,5344	1,3028
-40	-32,4	1082,565	0,07634	-33,3652	-0,56385	1,6362	0,01343
-50	-40,5	1673,055	0,03733	-41,2833	-0,56034	1,4307	0,01731
-60	-48,6	2394,765	0,02101	-49,2582	-0,55809	1,2895	0,02105
$i_3=-1$							
20	20	445	0,2317	22,0843	-0,7234	-1,3608	0,02676
30	30	945	0,02995	31,4577	-0,8972	-0,6504	0,1321
40	40	1645	0,003649	41,1109	-1,6392	0,5283	1,2915
-40	-40	1645	0,07682	-41,0775	-0,5637	1,6412	0,01338
-50	-50	2545	0,03748	-50,8733	-0,5602	1,4335	0,01728
-60	-60	3645	0,02107	-60,7332	-0,5568	1,2943	0,02101

Таблица 17

$\delta=1; -0,5 \leq m \leq 0,5$							
$d_0^{(3)}$	$x'_{30}$	$f_3^2$	$f_2^2$	$d_{20}$	$x_0$	$d_{10}$	$f_1^2$
$M=4$				$i_3=0,2$			
4	0,16	0,0496	0,04266	0,3181	0,03658	0,7537	0,1660
5	0,2	0,064	0,03078	0,3375	0,08884	0,5987	0,1031
6	0,24	0,0816	0,02153	0,3596	0,10714	0,4909	0,06505
-4	-0,16	0,0496	-0,08221	-0,1568	0,84178	-0,8256	0,2434
-5	-0,2	0,064	-0,06297	-0,2125	0,80024	-0,8627	0,2217
-6	-0,24	0,0816	-0,04767	-0,2616	0,7742	-0,8820	0,2123
$i_3=0,4$							
0	0	0,192	-0,3022	0,3333	1,32352	-0,4902	0,6488
2	0,32	0,2944	0,07561	0,7461	-0,8	1,8652	1,84
3	0,48	0,4224	0,07805	0,8497	-1,23528	1,0478	0,4476
4	0,64	0,6016	0,05613	0,9506	0,04836	0,7282	0,2201
-1	-0,16	0,2176	-0,4533	-0,007059	0,96564	-0,5333	0,2397
-2	-0,32	0,2944	-0,3781	-0,3113	0,84	-0,8183	0,1656
-3	-0,48	0,4224	-0,2525	-0,5467	0,780	-0,9467	0,1475
-4	-0,64	0,6016	-0,1612	-0,7379	0,74720	-0,9919	0,1454

$\delta=1; -0,5 \leq m \leq 0,5$							
$d_2^{(3)}$	$x'_{30}$	$f_3^2$	$f_2^2$	$d_{20}$	$x_0$	$d_{10}$	$f_1^2$
$i_3=1$							
0	0	3	-2,5556	0,8333	0,9783	-0,1449	0,1418
1	1	4	0,5469	2,375	1,6714	-0,2964	1,0579
2	2	7	0,08163	3,2143	-2	3,2143	7
3	3	12	0,1059	3,9583	-0,1721	1,1305	0,6321
4	4	19	0,06925	4,7632	0,06	0,7032	0,2726
-1	-1	4	-2,4219	-1,125	0,8161	-0,9411	0,08058
-2	-2	7	-1,1429	-2,5	0,75	-1,25	0,08036
-3	-3	12	-0,5191	-3,5417	0,7174	-1,2591	0,09074
-4	-4	19	-0,2632	-4,5	0,7	-1,2	0,1032
-5	-5	28	-0,4892	-5,4464	0,6906	-1,137	0,1155
$i_3=-1$							
0	0	-3	-3,4444	-0,8333	0,7258	0,1075	-0,07804
1	1	-2	-4,1875	1,25	0,8731	-1,1231	-0,1444
2	2	1	-0,04	-1,5	2	1,6	1
3	3	6	0,2014	1,9167	-0,3621	1,4454	1,3983
4	4	13	0,1006	3,2692	0,0882	0,6425	0,4048
-6	-6	33	-0,1359	-5,3788	0,6486	-1,2699	0,09642
-7	-7	46	-0,0816	-6,4891	0,6519	-1,1628	0,1114
$M=5 \quad i_3=0,2$							
9	0,36	0,1616	0,09411	0,4609	0,08594	0,4190	0,03082
-5	-0,2	0,072	-0,09086	-0,2222	0,71604	-0,8271	0,12
$i_3=1$							
0	0	4	-3,6875		0,8136	-0,66356	0,05171
1	1	5	-1,44		0,993	0,4069	0,1459
2	2	8	-0,2344		1,6667	-0,2917	1,1111
-7	-7	53	-0,09826	-7,4716	9,6368	-1,1084	0,07849
-8	-8	68	-0,06812	-8,4264	0,6349	-1,0614	0,08566
$i_3=-1$							
3	3	5	-0,24	1,2	2,625	-0,825	3,5156
4	4	12	0,07638	2,9166	-0,7272	1,8106	1,9835
-6	-6	32	-0,2431	-5,1562	0,6144	-1,4582	0,05226
-7	-7	45	-0,1412	-6,3111	0,6145	-1,3034	0,06206
-8	-8	60	-0,09027	-7,4166	0,6153	-1,1987	0,07101
$M=6 \quad i_3=1$							
0	0	5	-4,76	0,7	0,7353	-0,03529	0,02595
1	1	6	-2,368	2,416	0,8196	0,5970	0,05232
2	2	9	-0,6666	3,5	1	0,5	0,1666
3	3	14	-0,1288	4,321	1,579	-0,2577	0,9963

$\delta=1; -0,5 \leq m \leq 0,5$							
$d_2^{(3)}$	$x'_{30}$	$f_3^2$	$f_2^2$	$d_{20}$	$x_0$	$d_{10}$	$f_1^2$
-8	-8	69	-0,1006	-8,528	0,6085	-1,137	0,05458
-9	-9	86	-0,07237	-9,482	0,6069	-1,089	0,05954
-10	-10	105	-0,05387	-10,44	0,6060	-1,048	0,06427
$i_3=-1$							
3	3	4	-2,328	0,125	1,070	1,8045	0,1308
4	4	11	-0,0909	2,499	2,5	-1	3,4091
-8	-8	59	-0,1410	-7,262	0,5936	-1,330	0,04442
-9	-9	76	-0,09474	-8,361	0,5936	-1,2318	0,05034
-10	-10	95	-0,06714	-9,436	0,5940	-1,1572	0,0559
$M=7 \quad i_3=1$							
2	2	10	-1,19	3,6	0,8235	0,7764	0,06055
3	3	15	-0,3489	4,466	0,9936	0,4730	0,1799
4	4	22	-0,08471	5,272	1,4634	-0,1906	0,8245
-9	-9	87	-0,1007	-9,574	0,5902	-1,184	0,04091
-10	-10	106	-0,07467	-10,52	0,5888	-1,117	0,04453
$i_3=-1$							
4	4	10	-0,55	2	1,0909	0,9091	0,2083
5	5	19	-0,05679	3,631	2,1463	-0,7779	2,3934
-10	-10	94	-0,09654	-9,319	0,5791	1,2600	0,03821
$M=8 \quad i_3=1$							
3	3	16	-0,6318	4,5937	0,8230	0,7707	0,06880
4	4	23	-0,2098	5,4130	0,9775	0,4356	0,1829
5	5	32	-0,06226	6,2344	1,3510	-0,1166	0,6653
-9	-9	88	-0,1348	-9,6648	0,5788	-1,2436	0,02944
-10	-10	107	-0,09957	-10,6121	0,5772	-1,1893	0,03227
$i_3=-1$							
4	4	9	-1,5679	1,3889	0,8543	1,7568	0,05486
5	5	18	-0,2461	3,3056	1,0799	0,6145	0,2391
6	6	29	-0,04281	4,7069	1,8333	-0,5402	1,6111
$M=9 \quad i_3=1$							
4	4	24	-0,3733	5,541	0,8186	0,7230	0,07476
5	5	33	-0,1405	6,363	0,9559	0,4077	0,1784
6	6	44	-0,04907	7,204	1,2526	-0,04808	0,5375
-9	-9	89	-0,1749	-9,752	0,5706	-1,323	0,09194
$i_3=-1$							
5	5	17	-0,5917	2,941	0,8553	1,2036	0,07358
6	6	28	-0,1441	4,464	1,0531	0,4826	0,2418
7	7	41	-0,0351	5,756	1,5975	-0,3536	1,1197
-10	-10	92	-0,1797	-9,076	0,5621	-0,4860	0,02013
-20	-20	392	-0,01901	-0,1957	0,5615	-0,9824	0,04135

$\delta=1; -0,5 \leq m \leq 0,5$							
$d_2^{(3)}$	$x'_{30}$	$f_3^2$	$f_2^2$	$d_{20}$	$x_0$	$d_{10}$	$f_1^2$
$M=10$				$i_3=1$			
4	4	25	-0,5744	5,66	0,7396	0,9204	0,03928
5	5	34	-0,2424	6,4853	0,8113	0,6740	0,07819
6	6	45	-0,1017	7,3222	0,9320	0,3902	0,1697
7	7	58	-0,0405	8,1810	1,1697	0,01131	0,4394
-10	-10	109	-0,1628	-10,7752	0,5626	-1,3378	0,01865
-20	-20	409	-0,02151	-20,4267	0,5572	-0,9839	0,03481
$i_3=-1$							
5	5	16	-1,1729	2,5312	0,7513	1,7115	0,03206
6	6	27	-0,31	4,2037	0,8496	0,9467	0,08458
7	7	40	-0,09766	5,5625	1,02	0,4175	0,2304
8	8	55	-0,03008	6,7909	1,4231	-0,2140	0,8136
-10	-10	91	-0,2360	-8,9505	0,5568	-1,6063	0,01625
-20	-20	391	-0,02367	-19,5256	0,5342	-1,0286	0,03291

Таблица 18

$\delta=10; -0,5 \leq m \leq 0,5$							
$d_2^{(3)}$	$x'_{30}$	$f_3^2$	$f_2^2$	$d_{20}$	$x_0$	$d_{10}$	$f_1^2$
$M=2$				$i_3=0,2$			
5	0,2	0,12	0,2556	0,5333	-0,2391	1,9058	1,3724
6	0,24	0,1376	0,2312	0,5340	-0,0789	1,6487	1,072
7	0,28	0,1584	0,2018	0,5729	0,0335	1,4311	0,8889
8	0,32	0,1824	0,1724	0,5919	0,1161	1,2436	0,7679
9	0,36	0,2096	0,1455	0,6119	0,1787	1,0809	0,6828
10	0,4	0,24	0,1222	0,6333	0,2273	0,9394	0,6198
-1	-0,04	0,0816	-0,1163	0,2149	5,7975	-4,52301	25,9232
-2	-0,08	0,0864	-0,2092	0,1237	3,1013	-2,2848	6,9731
-3	-0,12	0,0944	-0,2650	0,03254	2,4756	-1,7129	3,4396
-4	-0,16	0,1056	-0,2847	-0,05394	2,0645	-1,5342	2,1977
-5	-0,2	0,12	-0,2778	-0,1333	1,82	-1,4867	1,6224
-6	-0,24	0,1376	-0,2558	-0,2051	1,6587	-1,4843	1,3109
-7	-0,28	0,1584	-0,2268	-0,2699	1,5450	-1,4945	1,1246
-8	-0,32	0,1824	-0,1970	-0,3288	1,4609	-1,5048	1,0054
-9	-0,36	0,2096	-0,1691	-0,3829	1,3966	-1,5111	0,9254
-10	-0,4	0,24	-0,1444	-0,4333	6,7308	-1,5128	0,8698
$i_3=1$							
0	10	-8	1,5	1,875	-0,375	0,7031	
1	11	-4,1529	3,2727	2,4950	-0,2223	1,8955	
2	14	-1,0714	4,5	4,8333	-2,3333	13,3492	
3	19	0,2147	5,3684	-10,1129	12,4813	128,4724	
4	26	0,5325	6,1154	-1,5556	3,6709	7,8642	
5	35	0,5204	6,8571	-0,5392	2,3964	3,2564	

$\delta=10; -0,5 \leq m \leq 0,5$							
$d_2^{(3)}$	$x'_{30}$	$i_3^2$	$i_2^2$	$d_{20}$	$x_0$	$d_{10}$	$i_1^2$
6	46	0,4301	7,6304	-0,1484	1,7789	2,02476	
7	59	0,3383	8,4407	0,05626	1,3844	1,4941	
8	74	0,2630	9,2838	0,1806	1,1032	1,2062	
9	91	0,2050	10,1538	0,2629	0,89096	1,0268	
10	110	0,1612	11,0455	0,3205	0,7249	0,90401	
-1	11	-9,1116	-0,5455	1,5907	-1,1362	0,4209	
-2	14	-7,1939	-2,3571	1,4291	-1,7862	0,3384	
-3	19	-4,7715	-3,7895	1,3258	-2,1153	0,3177	
-4	26	-3,0178	-4,9615	1,2549	-2,2164	0,3199	
-5	35	-1,9286	-6,00	1,2037	-2,2037	0,3312	
-6	46	-1,2713	-6,9783	1,1654	-2,1437	0,3461	
-7	59	-0,8683	-7,9322	1,1361	-2,0683	0,3624	
-8	74	-0,6136	-8,8784	1,1131	-1,9915	0,3789	
-9	91	-0,4471	-9,8242	1,0949	-1,91904	0,3951	
-10	110	-0,3347	-10,7727	1,0802	-1,85297	0,4108	
$i_3=-1$							
5	15	1,0556	2,6667	-1,4474	3,7807	10,0554	
6	26	0,7544	4,2692	-0,2647	1,9955	3,6436	
7	39	0,5112	5,5897	0,08521	1,32504	2,2653	
8	54	0,3567	6,7963	0,25	0,9537	1,6875	
9	71	0,2574	7,9437	0,3439	0,7124	1,3712	
10	90	0,1914	9,0556	0,4032	0,5412	1,1707	
20	390	0,02498	19,5256	0,5263	-0,05196	0,5402	
$M=3 \quad i_3=0,2$							
0	0	0,16	-0,65	0,2	1,23076	-0,2308	0,28402
1	0,04	0,1616	-0,5593	0,2776	1,3155	-0,1274	0,3631
2	0,08	0,1664	-0,4549	0,3492	1,4268	-0,08068	0,4901
3	0,12	0,1744	-0,3489	0,4136	1,5790	-0,1111	0,7053
4	0,16	0,1856	-0,2512	0,4703	1,7988	-0,2471	1,0996
5	0,2	0,200	-0,168	0,52	2,14286	-0,5429	1,9133
6	0,24	0,2176	-0,1016	0,5635	2,7553	-1,1377	3,9508
7	0,28	0,2384	-0,05157	0,6021	4,1441	-2,5334	11,3559
-1	-0,04	0,1616	-0,7161	0,1184	1,1643	-0,3722	0,2328
-2	-0,08	0,1664	-0,7507	0,03538	1,1108	-0,5339	0,1989
-3	-0,12	0,1744	-0,7529	-0,04661	1,0671	-0,7	0,17596
-4	-0,16	0,1856	-0,7268	-0,1255	1,0307	-0,8583	0,1605
-5	-0,2	0,2	-0,68	-0,2	1	-1	0,15
-6	-0,24	0,2176	-0,6207	-0,2694	0,97366	-1,1209	0,1431
-7	-0,28	0,2384	-0,5561	0,3337	0,9514	-1,2199	0,1388
-8	-0,32	0,2624	-0,4915	0,3932	0,9319	-1,2978	0,1363
-9	-0,36	0,2896	-0,4305	0,4484	0,9149	-1,3569	0,1351
-10	-0,4	0,32	-0,375	-0,5	0,9	-1,4	0,135
-20	-0,8	0,8	-0,098	-0,92	0,8163	-1,4163	0,1562
$i_3=1$							
3	29	-6,3555	5,7586	1,2245	1,5341	0,1128	
4	36	-2,534	6,7778	1,3275	1,4503	0,1859	
5	45	-1,8889	7,6667	1,4706	1,1961	0,3244	
6	56	-0,9821	8,5	1,6818	0,8182	0,6061	
7	69	-0,4925	9,3188	2,0235	0,2954	1,2537	
8	84	-0,2296	10,1429	2,6667	-0,5238	3,1111	
9	101	-0,08872	10,9802	4,3149	-2,3347	11,6558	
-7	69	-2,845	-8,7391	-2,6062	0,8671	0,05337	

Продолжение табл. 18

$\delta=10; 0,5 \leq m \leq 0,5$							
$d_2^{(3)}$	$x'_{30}$	$f_3^2$	$f_2^2$	$d_{20}$	$x_0$	$d_{10}$	$f_1^2$
-8	84	-2,0437	-9,6667	-2,521	0,8544	0,05866	
-9	101	-1,5003	-10,5842	0,8432	-2,4273	0,06404	
-10	120	-1,125	-11,5	0,8333	-2,3333	0,06944	
-20	420	-0,1457	-20,9048	0,7782	-1,683	0,1193	
$i_3=-1$							
6	16	-14,375	-0,25	1,4075	4,8424	0,1213	
7	29	-3,5018	2,8621	1,6112	2,5267	0,3341	
8	44	-1,1467	4,8182	1,9459	1,2359	0,8678	
9	61	-0,4045	6,377	2,5947	0,02827	2,5455	
10	80	-0,125	7,75	4,375	-2,125	11,4844	
$M=4 \quad i_3=0,2$							
3	0,12	0,2544	-0,8136	0,3904	0,9728	0,3795	0,08841
4	0,16	0,2656	-0,694	0,4552	1,0042	0,4717	0,1046
5	0,2	0,28	-0,5776	0,5143	1,0406	0,5308	0,1262
6	0,24	0,2976	-0,4703	0,568	1,0833	0,5565	0,1552
7	0,38	0,3184	-0,3754	0,6167	1,1338	0,5497	0,1947
8	0,32	0,3424	-0,2943	0,6611	1,1944	0,5112	0,2492
9	0,36	0,3696	-0,2269	0,702	1,2684	0,4416	0,3262
10	0,4	0,4	-0,172	0,74	1,3605	0,3395	0,4381
-1	-0,04	0,2416	-1,1624	0,086	0,8811	-0,2519	0,05481
-2	-0,08	0,2464	-1,182	0,0044	0,8652	-0,4422	0,95098
-3	-0,12	0,2544	-1,17	-0,076	0,8492	-0,62899	0,04824
-4	-0,12	0,2656	-1,13	-0,154	0,8354	-0,8054	0,04635
-5	-0,2	0,28	-1,0673	-0,23	0,8231	-0,96599	0,04514
-6	-0,24	0,2976	-0,991	-0,3	0,812	-1,1076	0,04449
-7	-0,28	0,3184	-0,906	-0,3654	0,802	-0,2289	0,04427
-8	-0,32	0,3424	-0,8184	-0,4275	0,7924	-1,3298	0,04442
-9	-0,36	0,3696	-0,7329	-0,4855	0,784	-1,4116	0,04486
-10	-0,4	0,4	-0,652	-0,54	0,776	-1,4761	0,04554
-20	-0,8	0,88	-0,1917	-0,973	0,7241	-1,5878	0,05886
$i_3=1$							
6	66	-4,102	9,106	0,9863	2,1198	0,04566	
7	79	-2,64	9,975	1,024	1,9511	0,06299	
8	94	-1,707	10,82	1,0676	1,7515	0,08747	
9	111	-1,1125	11,658	1,1203	1,5374	0,1223	
10	130	-0,731	12,5	1,184	1,3158	0,1726	
$i_3=-1$							
8	34	-13,737	1,6765	1,014	5,3097	0,02853	
9	51	-5,5777	4,2	1,0585	3,7454	0,095017	
10	70	-2,684	6,071	1,112	2,8164	0,08197	
-20	370	-0,0441	-18,311	+0,6954	-2,3845	0,03651	
-30	1570	-0,1046	-28,9368	+0,6775	-1,7407	0,05867	
-40	2470	-0,0403	-39,2197	+0,6690	-1,4493	0,07786	
$M=5 \quad i_3=0,2$							
6	0,24	0,3776	-0,8521	0,5705	0,8527	0,7998	0,04255



$\delta=10; -0,5 \leq m \leq 0,5$							
$d_2^{(3)}$	$x'_{30}$	$f_3^2$	$f_2^2$	$d_{20}$	$x_0$	$d_{10}$	$f_1^2$
7	0,28	0,3984	-0,7289	0,6254	0,86894	0,8580	0,04865
8	0,32	0,4224	-0,6161	0,6761	0,8868	0,8935	0,05613
9	0,36	0,4496	-0,5156	0,723	0,9066	0,9084	0,06528
10	0,4	0,48	-0,4278	0,7663	0,9286	0,9048	0,07653
$i_3=1$							
10		140	-2,0663	13,0714	0,8827	2,1887	0,03227
20		440	-0,1007	21,8864	1,2821	0,6043	0,3616
$i_3=-1$							
20		360	-0,1582	17,8611	+1,2195	0,9194	0,2677
$M=6 \quad i_3=0,2$							
10	0,4	0,56	-0,7204	0,7857	0,7918	1,1368	0,02848
20	0,8	1,04	-0,135	1,1615	0,94726	0,8603	0,10803
$i_3=1$							
20		450	-0,2933	22,3	0,9091	1,3909	0,06887
30		950	-0,03396	31,6158	1,3009	0,3148	0,4589
-50		2550	-0,05085	-50,9667	0,6105	-1,5772	0,03157
-60		3650	-0,02848	-60,8123	0,6062	-1,4185	0,03804
$i_3=-1$							
10		50	-36,74	0,7	0,7608	1,8661	0,05147
20		350	-0,4947	17,243	0,8911	0,4716	0,3802
-30		850	-0,3347	-28,1941	+0,6238	-1,643	0,03012
-40		1550	-0,1189	-38,6871	0,6145	-1,4592	0,03676
50		2450	-0,0553	-48,9653	0,6083	-1,3306	0,04301
$M=7 \quad i_3=0,1$							
20	0,2	0,1	-0,19	0,36	0,82353	0,7765	0,06055
30	0,3	0,15	-0,0349	0,4467	0,99363	0,47304	0,17998
$i_3=1$							
20		460	-0,5922	22,6957	0,7821	1,9135	0,02512
30		960	-0,0920	31,9167	0,9198	0,9969	0,09871
40		1660	-0,0172	41,4699	1,2685	0,2014	0,4674

$\delta=10; -0,5 \leq m \leq 0,5$							
$d_2^{(3)}$	$v_{30}$	$t_3^2$	$t_2^2$	$d_{20}$	$v_0$	$d_{10}$	$t_1^2$
$i_3=-1$							
30 40		840 1540	-0,1222 -0,0205	27,9048 38,4675	+0,9049 +1,2320	1,1904 0,3004	0,08359 0,4091
$M=8 \quad i_3=0,1$							
30 40	0,3 0,4	0,16 0,23	-0,06318 -0,02098	0,4594 0,5413	0,82303 0,97748	0,7707 0,4356	0,068790 0,1829
$i_3=0,2$							
30	1,2	2	-0,1061	1,572	0,80316	1,0568	0,05119
$i_3=1$							
30 40		970 1670	-0,1796 -0,04238	32,2113 41,7036	0,78796 0,9179	1,4234 0,7857	0,03823 0,1171
$i_3=-1$							
40		1530	-0,05118	38,1993	0,9057	0,89498	0,1045
$M=9 \quad i_3=0,1$							
30 40	0,3 0,4	0,17 0,24	-0,09723 -0,03733	0,4706 0,5542	0,74110 0,81860	0,9648 0,7231	0,03500 0,07476
$i_3=0,2$							
30 40	1,2 1,6	2,08 3,2	-1,1689 -0,05488	1,6077 1,9450	0,7294 0,8018	1,3090 0,9232	0,02593 0,05972
$M=10 \quad i_3=1$							
40		1680	-0,07905	41,9345	0,7889	1,1456	0,04860
$i_3=0,1$							
40	0,4	0,25	-0,0574	0,566	0,7955	0,9204	0,03928
$i_3=1$							
50		2590	-0,0431	51,7587	0,7861	0,9726	0,05591

$\delta=10; -0,5 \leq m \leq 0,5$							
$d_2^{(3)}$	$x'_{30}$	$f_3^2$	$f_2^2$	$d_{20}$	$x_0$	$d_{10}$	$f_1^2$
$i_3=-1$							
40 50		1510 2410	-0,1623 -0,0501	37,6523 48,1556	0,7176 0,7807	1,6301 1,0637	0,02233 0,05132
$\delta=1; -0,5 \leq m \leq 0,5$							
$M=20 \quad i_3=0,2$							
10 20	0,4 0,8	0,312 0,792	-0,0853 -0,00277	0,6487 0,9747	0,6313 1,223	0,6123 -0,3494	0,02372 0,6496
$i_3=0,4$							
0		1,216	-3,0178	0,2211	0,55668	-0,00406	0,00226
$i_3=1$							
10 20		119 419	-0,235 -0,00432	11,6849 20,932	0,6161 1,0942	1,0687 -1,6222	0,01379 0,4400
$i_3=-0,4$							
0		-1,216	-3,0622	-0,2211	0,54864	0,004	-0,00219

Т а б л и ц а 19

$d_2^{(3)}$	$x'_{30}$	$f_3^2$	$f_2^2$	$d_{20}$	$x_{10}$	$d_{10}$	$f_1^2$
28	28	739	0,05657	26,3322	-0,83274	-0,83505	0,08134
28,2	28,2	750,24	0,05423	26,5452	-0,83705	-0,81774	0,08417
28,4	28,4	761,56	0,05199	26,7578	-0,84147	-0,80055	0,08711
28,6	28,6	772,96	0,04986	26,9705	-0,84596	-0,78348	0,09016
28,8	28,8	784,44	0,04782	27,1829	-0,85059	-0,76647	0,09333
29	29	795	0,04586	27,395	-0,85532	-0,74957	0,09662
29,6	29,6	831,16	0,04049	28,0305	-0,87019	-0,69929	0,10729
30	30	855	0,03727	28,4532	-0,88073	-0,66605	0,11514
31	31	916	0,03034	29,507	-0,90948	-0,58341	0,13778
32	32	979	0,02472	30,55719	-0,94229	-0,50050	0,16576

Рассчитаем параметры этой системы, взяв  $i_2 = -0,4$  [27]; получаем новую систему, в которой, помимо первого и третьего компонентов, перемещается еще и второй компонент с  $i_2 = -0,4$ . Система имеет удовлетворительные параметры, перепад увеличений  $M=8,7$  и является системой наименьшей длины [27].

Итак, используя описанные выше свойства панкратических систем, можно из исходной системы получить еще ряд систем, имеющих те же значения максимального смещения ПИ  $\Delta_{\text{г.а.х}}$  и перепада увеличений  $M$ . При необходимости можно выбранную систему трансформировать в зеркально-линзовую.

### 3. ОБ АБЕРРАЦИОННОЙ КОРРЕКЦИИ ПАНКРАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Известно [40], что нельзя дать в общем виде какие-либо определенные соотношения, связывающие фокусные расстояния, относительные отверстия компонентов, расстояния между компонентами оптической системы и ее характеристики (увеличение, апертуру, поле зрения, качество изображения). Поэтому любой процесс вычисления рационально разделить на ряд этапов, по возможности не зависящих один от другого. Такое разделение значительно упрощает расчет главным образом потому, что в каждом этапе число подлежащих определению неизвестных параметров меньше, чем в общей задаче, а следовательно, и решение каждого этапа может быть получено проще.

Расчет оптических систем также может быть разбит на несколько этапов. На первом этапе выбирают общую схему оптической системы, т. е. число компонентов, с помощью которых можно решить поставленную задачу, их взаимное расположение, примерные размеры и фокусные расстояния отдельных компонентов. Эта первоначальная стадия расчета называется обычно габаритным расчетом. После этого конструктор может приступить к предварительному конструированию (выбору конструктивных элементов компонентов), так как ему известны с достаточной точностью все размеры и другие необходимые для конструирования сведения. Затем проводится окончательное конструирование системы, заканчивающееся выбором всех компонентов (их радиусов кривизны, сорта стекол и т. д.) системы с обеспечением необходимого качества.

Рассмотренная в пп. 2—5 гл. 1 методика расчета гауссовых параметров панкратических систем с линейной связью между перемещениями компонентов позволяет провести габаритный расчет оптической системы переменного увеличения, обеспечивающей заданный перепад увеличений  $M$  и имеющей заданные размеры. Однако окончательно вопрос о возможности использования этой системы для заданных целей может быть решен после проведения ее абберационной коррекции.

Необходимость абберационной коррекции обусловлена тем, что габаритный расчет оптической системы проводится на базе основных положений идеальной оптики (гауссова оптика), т. е. считается, что гомоцентрический пучок после прохождения оптической системы остается гомоцентрическим, а плоскость изображается плоскостью. Однако в реальных оптических системах эти основные положения идеальной оптики выполняются только приближенно с некоторой степенью точности в зависимости от условий работы системы и ее

характеристик (относительное отверстие, поле зрения и т. д.). Пучок лучей после прохождения реальной системы перестает быть гомотричным, точка уже не изображается точкой, а представляет собой некоторую фигуру рассеяния.

Отклонение хода реального луча в оптической системе от того пути, который он проходил бы в идеальной системе, называется aberrацией луча (в лучевой оптике). Если рассматривать прохождение излучения через систему с точки зрения волновой оптики, то можно ввести понятие волновой aberrации, которая характеризует деформацию волнового фронта, обусловленную наличием на пути излучения диафрагм конечного размера. Зная волновую aberrацию, можно перейти к геометрической, а от геометрической aberrации можно перейти к волновой.

Выражение для отклонения луча в некоторой плоскости от точки, являющейся ее гауссовым (параксиальным) изображением, можно представить в таком виде [40]:

$$\begin{aligned}
 2n' \delta g'_{III} \alpha' &= \frac{m_1 (m_1^2 + M_1^2)}{(x_1 - s_1)^3} \left( \frac{s_1}{h_1} \right)^3 S_I - \frac{3m_1^2 + M_1^2}{(x_1 - s_1)^3} l_1 \times \\
 &\times \left( \frac{s_1}{n_1} \right)^2 \frac{x_1}{y_1} S_{II} + \frac{m_1 l_1^2}{(x_1 - s_1)^3} \left( \frac{s_1}{h_1} \right) \left( \frac{x_1}{y_1} \right)^2 \times \\
 &\times (3S_{III} + J^2 S_{IV}) - \left( \frac{x_1}{y_1} \right)^3 \frac{l_1^3}{(x_1 - s_1)^3} S_V; \\
 2n' \delta G'_{III} \alpha' &= \frac{M_1 (m_1^2 + M_1^2)}{(x_1 - s_1)^3} \left( \frac{s_1}{h_1} \right)^3 \times \\
 &\times S_I - \frac{2m_1 M_1}{(x_1 - s_1)^3} l_1 \left( \frac{s_1}{h_1} \right)^2 \frac{x_1}{y_1} S_{II} + \\
 &+ \frac{M_1 l_1^2}{(x_1 - s_1)^3} \left( \frac{s_1}{n_1} \right) \left( \frac{x_1}{y_1} \right)^2 (S_{III} + J^2 S_{IV}). \quad (100)
 \end{aligned}$$

Точка, для которой записаны выражения aberrаций, находится в меридиональной плоскости;  $x_1 - s_1 = -p_1$  — расстояние между плоскостями предметов и входного зрачка;  $S_I$ ,  $S_{II}$ ,  $S_{III}$ ,  $S_{IV}$ ,  $S_V$  — коэффициенты aberrаций третьего порядка; эти коэффициенты при заданном положении плоскостей предмета и входного зрачка зависят от конструктивных элементов оптической системы и выражаются в переменных Ланге следующим образом:

$$\begin{aligned}
 S_I &= \sum_{k=1}^{k=p} h_k P_k^1; & S_{II} &= \sum_{k=1}^{k=p} h_k P_k^* \frac{\Delta \beta_k}{\Delta \alpha_k}; \\
 S_{III} &= \sum_{k=1}^{k=p} h_k P_k^* \left( \frac{\Delta \beta_k}{\Delta \alpha_k} \right)^2; & S_{IV} &= \sum_{k=1}^{k=p} \frac{1}{h_k} \frac{\Delta \alpha_k n_k}{n_k \alpha'_k};
 \end{aligned}$$

$$S_V = \sum_{k=1}^{k=p} \left[ h_k P_k^* \left( \frac{\Delta \beta_k}{\Delta \alpha_k} \right)^2 + \frac{J^2}{h_k} \frac{\Delta \alpha_k n_k}{n_k n'_k} \right] \frac{\Delta \beta_k}{\Delta \alpha_k},$$

где

$$P_k^* = \left( \frac{\Delta \alpha_k}{\Delta \frac{1}{n_k}} \right)^2 \Delta \frac{\alpha_k}{n_k}; \quad J = n_1 \alpha_1 l_1 = n_k \alpha_k l_k = \text{const.}$$

Величина  $J$  зависит от нормировки начальных значений переменных Ланге, а именно ордината  $l_1$  точки пересечения второго

вспомогательного луча с плоскостью предметов  $l_1 = (x_1 - s_1) \frac{y_1}{x_1}$ ; при нормировке  $\alpha_1 = 1$ ;  $\beta_1 = 1$ ;  $h_1 = s_1$ ;  $y_1 = x_1$ ;  $J = n_1 (x_1 - s_1)$ ; при нормировке  $\alpha' = 1$  ( $\alpha_1 = 1/\gamma$ );  $\beta_1 = 1$ ;  $h_1 = s_1 \alpha_1$ ;  $y_1 = x_1$   $J = n_1 \alpha_1 (x_1 - s_1)$ .

Координаты луча в пространстве:  $l_1$  — координата точки  $A$  пересечения луча с меридиональной плоскостью;  $m_1$ ,  $M_1$  — координаты точки пересечения луча с некоторой вспомогательной плоскостью, перпендикулярной оси системы (обычно это плоскость входного зрачка). Расстояние проекции точки  $A$  на ось от вершины первой преломляющей поверхности обозначено  $s_1$ .

Как было сказано выше, гомоцентрический пучок лучей после прохождения через оптическую систему образует в плоскости изображения некоторую фигуру рассеяния (размытое световое пятно). Формулы (100) и позволяют определить точку пересечения каждого луча пучка с плоскостью изображения. Однако эти формулы в общем виде громоздки. Поэтому для упрощения анализа фигуры рассеяния полагают, что в формулах (100) все коэффициенты аберраций, за исключением одного, равны нулю. Каждый из коэффициентов  $S_I - S_V$  характеризует соответствующую аберрацию:  $S_I$  — сферическую аберрацию;  $S_{II}$  — кому;  $S_{III}$  — кривизну поверхности, по которой располагаются меридиональные фокусы астигматического элементарного (бесконечно тонкого) пучка;  $S_{IV}$  — кривизну поверхности, по которой располагаются сагиттальные фокусы пучка;  $S_V$  — дисторсию изображения.

Реальная оптическая система имеет одновременно все аберрации, и анализ аберрационной фигуры рассеяния лучей путем выделения аберраций отдельных видов — только искусственный прием, облегчающий проведение ее анализа.

При рассмотрении аберраций выше считалось, что свет, проходящий через оптическую систему, монохроматический. Однако, как известно [27], прохождение через оптическую систему светового монохроматического пучка (присутствует излучение всех длин волн в некотором интервале) связано с дисперсией света, обусловленной зависимостью показателя преломления среды от длины волны излучения. Поэтому лучи, соответствующие, например, двум различным длинам волн и вошедшие в оптическую систему по одному направлению, пересекут плоскость изображения уже в двух различных точках. В связи с этим возникает хроматическая аберрация положения  $\delta x'_{xp}$  (разность расстояний от последней поверхности оптической системы до параксиальных изображений точки, образуемых лучами различных длин волн) и хроматическая

абберация увеличения  $\delta L'_{xp}$  (разность ординат точек пересечения плоскости изображения главными лучами различных длин волн). Система с исправленной хроматической абберацией для двух цветов (длин волн) называется ахроматизированной.

Для количественной оценки хроматических аббераций обычно выбирают две длины волны  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , лежащие по обе стороны относительно средней длины волны  $\lambda_0$ , для которой скорректированы монохроматические абберации. Например, при средней длине волны  $\lambda_0=589,3$  нм, соответствующей желтой линии  $D$  натрия, берут  $\lambda_1=656,3$  нм (линия  $C$  — водорода) и  $\lambda_2=486,1$  нм (линия  $F$  — водорода). Хроматические абберации определяются разностью координат вышедших из системы лучей, соответствующих длинам волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ :

$$\delta s'_{xp} = s'_{\lambda_2} - s'_{\lambda_1}; \quad \delta L'_{xp} = L'_{\lambda_2} - L'_{\lambda_1}.$$

Выбор длин волн определяется назначением оптической системы. Например, объектив фотоаппаратов широкого применения, предназначенные для фотографирования на черно-белую и цветную пленки, ахроматизируются для длин волн  $\lambda'_G=434,1$  нм и  $\lambda'_C=656,3$  нм, а монохроматические абберации корректируются для длины волны  $\lambda'_e=546,1$  нм — для синей, красной и зеленой областей спектра, которым соответствуют максимумы монохроматических фотоактивных потоков трехслойных цветных негативов (с учетом спектрального пропускания объективов).

В настоящее время также разработана [6, 7] теория термооптических аббераций, позволяющая учесть влияние на качество изображения, даваемого оптическими системами, изменения температуры окружающей среды (и, следовательно, изменения температуры самих оптических деталей).

При изменении температуры меняются показатель преломления сред, радиусы кривизны и толщины линз, размеры оправ линз и труб, соединяющих отдельные оптические детали. В результате всего перечисленного плоскость изображения оптической системы перемещается, изменяется ее фокусное расстояние, а следовательно, и увеличение системы, изменяются также и абберации. Теория термооптических аббераций позволяет создавать оптические системы, в которых влияние термооптических аббераций на качество изображения сводится к минимуму.

Уже на стадии габаритного расчета возникают затруднения при выборе фокусных расстояний компонентов и их диаметров, так как для успешного проведения в дальнейшем абберационного расчета, обеспечивающего хорошее качество изображения системы, необходимо стремиться к тому, чтобы относительные отверстия компонентов по возможности были минимальными, поля зрения компонентов имели бы реальные величины, а отношения фокусных расстояний компонентов не были слишком большими. При этом возникают трудности в выборе типа компонентов.

Теоретически всегда можно рассчитать сложную оптическую систему (с большим числом поверхностей) с очень малыми абберациями при любом относительном отверстии и угле поля зрения. Однако такие системы будут очень сложны, трудны в изготовлении и дороги и, следовательно, неприемлемы к практическому использованию. Поэтому в оптических приборах применяют компоненты, состоящие по возможности из небольшого числа линз. В качестве

объективов, коллективов и оборачивающих систем используют либо простые линзы, либо двухлинзовые склеенные компоненты, либо, в очень редких случаях, тройные склеенные компоненты, либо, в очень редких случаях, тройные склеенные или двухлинзовые несклеенные объективы. Более сложные системы встречаются, как правило, только в фотообъективах и микроскопах. Поэтому при выборе типа компонента желательно заранее знать некоторые предварительные данные об aberrациях наиболее часто применяемых компонентов оптических систем [40]. Эти сведения могут послужить также основанием для выбора соответствующих компонентов при реальном макетировании системы или ее проектировании с использованием готовых оптических элементов (линз, объективов).

Простые линзы, как правило, используют в качестве коллективов, помещаемых вблизи плоскости изображения, или в том случае, если компонент имеет очень малое относительное отверстие (порядка  $1/15$ — $1/30$  и меньше), а следовательно, и малые значения aberrаций.

Относительные отверстия двухлинзовых склеенных систем не могут быть больше  $1:4$  при фокусных расстояниях менее 150 мм,  $1:5$  при фокусных расстояниях до 300 мм,  $1:6$ —до 500 мм,  $1:8$ — $1:10$ —до 1000 мм. Поле зрения этих систем не должно превышать  $10$ — $12^\circ$  при малых и  $7$ — $10^\circ$  при больших фокусных расстояниях.

Трехлинзовые склеенные системы практически не расширяют возможностей склеенных объективов.

В несклеенных двухлинзовых системах при соответствующем выборе стекол можно значительно уменьшить aberrации и довести относительное отверстие до  $1:2,5$ .

В тех случаях, когда двухлинзовый склеенный объектив не может быть использован из-за большого относительного отверстия, его можно заменить системой из нескольких линз, разделенных воздушными промежутками. Если все линзы имеют одинаковые фокусные расстояния, то каждая из них имеет значительно меньшее относительное отверстие, чем вся система в целом, так как фокусное расстояние каждой отдельной линзы в несколько раз больше, чем фокусное расстояние всего компонента (можно довести относительное отверстие до  $1:2,5$ — $1:3$ ).

В качестве компонентов используют и сложные объективы, применяемые, например, для фотографии. Это необходимо в тех случаях, когда компоненты должны обеспечивать хорошее качество изображения для больших углов поля зрения.

Вопросам рационального расчета панкратических систем (в основном панкратических объективов) посвящен ряд работ советских и зарубежных авторов [5—7, 39, 42]. По-видимому, первое серьезное исследование по этому вопросу, относящееся к анализу коррекционных возможностей трехкомпонентных панкратических объективов с механической компенсацией, было проведено Д. С. Волосовым еще в 30-х годах, а в 50—60-х годах в связи с бурным развитием кинофототехники и телевидения снова начинают появляться работы по этому вопросу. Был опубликован ряд работ в отечественной печати: это работы М. С. Стефанского [42], М. Г. Шпаккина [48], В. И. Савоскина [39], Е. С. Полтыревой [34] и др.

Появились значительные работы и в зарубежной печати [51, 55], в которых предлагались методы расчета панкратических систем с оптической компенсацией (при  $i_0 = i_2 = i_4 = \dots = 0$  и  $i_1 = i_3 = i_5 = \dots = 1$ ).



Кратко остановимся на некоторых результатах этих работ, которые полезно знать при расчете панкратических систем и которые могут помочь в выборе путей абберационной коррекции системы.

Бергстейном и Мотцем [55] рассмотрено приложение теории аббераций третьего порядка к оптическим системам с переменным фокусным расстоянием. Ими рассмотрено изменение аббераций в зависимости от изгиба линз, так как для этих систем конструктору практически всегда (из габаритного расчета) жестко заданы оптическая сила и положение компонентов, которые определяют перепад увеличений системы и т. д., поэтому он может варьировать только изгибом линз. Полученные конструктором зависимости, связывающие изменения коэффициентов Зайделя с изгибом линз, позволяют провести исправление аббераций системы с переменным фокусным расстоянием. Кратко изложим основное содержание предлагаемой методики, отсылая читателя за подробностями к первоисточнику [55].

Для исправления аббераций системы изменяют только изгибы линз (оптическая сила отдельных линз не меняется). Поскольку при изгибе кривизна поля не меняется, то следует рассматривать только остальные четыре абберации, определяемые  $S_I$ ,  $S_{II}$ ,  $S_{IV}$ ,  $S_V$ . Таким образом, чтобы исправить систему, необходимо иметь по крайней мере четыре компонента (четыре изгибаемые линзы). Хроматические абберации не учитываются.

Вопрос об исправлении хроматической абберации в объективах с переменным фокусным расстоянием, содержащих три или более подвижных компонента, рассмотрен в [58].

Бергстейн утверждает [51], что панкратические системы минимальной длины при  $i_1 = i_3 = i_5 = \dots = 1$  являются не только самыми короткими системами при заданном числе элементов, но также и оптимальными в отношении других качеств.

Для сохранения постоянства относительного отверстия (и, следовательно, светосилы) входной зрачок должен оставаться постоянным во всем рабочем интервале, поэтому диафрагму необходимо помещать за последним подвижным элементом. Фактически почти всегда оказывается возможным сконструировать такую систему с переменным фокусным расстоянием, у которой диаметры отдельных элементов будут определяться требуемой апертурой, а не полем зрения, которое должен обеспечивать этот объектив.

Система с переменным фокусным расстоянием должна быть исправлена на абберации изображения для каждого положения подвижных компонентов. Так как абберации изменяются вместе с изменением положения подвижных элементов, их исправление для всего рабочего интервала окажется возможным лишь в том случае, если величины аббераций, вносимых каждым элементом, будут не очень велики при любом положении подвижных элементов. Поскольку для системы с переменным фокусным расстоянием обычно требуются элементы с абсолютными оптическими силами, сравнимыми с ее максимальной общей оптической силой, а абберации одиночной линзы быстро возрастают с ростом ее оптической силы, то необходимо, чтобы эти оптические силы и их разности были как можно меньше. Если система должна быть оптимальной в этом

отношении, то необходимо, чтобы  $\sum_{\alpha=1}^{n-1} (f_{\nu}^2) \rightarrow \max$ ,  $\prod_{\nu=1}^{n-1} (f_{\nu}^2) \rightarrow \max$ .

Можно показать, что оба условия выполняются одновременно для систем минимальной длины.

При любых заданных значениях  $M$  и  $n$  получается ряд систем минимальной длины. Однако из всего множества систем минимальной длины имеется лишь одна система, имеющая минимальную длину и характеризующая, кроме того, тем, что в ней не образуются действительные изображения в пределах объектива. В этой системе положительные и отрицательные элементы следуют один за другим, поэтому петцвальевская кривизна объектива легко может быть сведена до нуля. Очевидно также, что удовлетворительное исправление аберраций изображения в такой системе с чередующимися положительными и отрицательными элементами может быть обеспечено легче, чем в любой другой. И в то же время в этой системе сведено до минимума наибольшее отклонение изображения в рабочем интервале объектива. Таким образом, по утверждению Бергстейна, такая линзовая система является оптимальной во всех отношениях. Он считает, что для любых заданных значений относительного фокального интервала и числа  $n$  элементов возможны лишь две оптимальные гауссовы системы.

Бергстейном предложена следующая методика аберрационной коррекции панкратических систем [51].

Основная проблема, связанная с исправлением аберраций линзовой системы с переменным фокусным расстоянием, возникает вследствие того, что такая система должна работать в конечном интервале фокусных расстояний. Очевидно, что свести до нуля аберрации во всем этом интервале невозможно. Лучшее, что может быть сделано, — это сведение аберраций до нуля или любого желаемого значения в конечном числе точек (т. е. фокусных расстояний) в предположении, что в промежуточных точках аберрации будут оставаться в допустимых пределах. Ясно, что число точек, в которых аберрации будут иметь заданные значения, зависит от числа компонентов в передней части панкратической системы.

Для упрощения проблемы конструирования и получения большей свободы Бергстейн предложил исправлять систему для ряда дискретных значений фокусных расстояний при условии, что аберрации в этих положениях должны быть одинаковыми (при этом им не приписывается никаких конкретных значений). Затем аберрации во всех точках можно сделать как угодно малыми с помощью дополнительной системы с фиксированным фокусным расстоянием, расположенной позади переменной части системы и имеющей почти такие аберрации на всем интервале изменения фокусных расстояний системы, что и рассматриваемая система. Такую фиксированную систему всегда можно сконструировать с тем условием, чтобы ее аберрации были равны и противоположны по знаку аберрациям переменной части системы в заданных точках. Поэтому удовлетворительное исправление во всем рабочем интервале изменения фокусных расстояний объектива может быть достигнуто, если максимальное отклонение любой конкретной аберрации будет находиться в допустимых пределах. Однако, поскольку число точек, в которых аберрации могут быть сделаны равными между собой, мало (в случае панкратической системы из четырех компонентов аберрации могут быть сделаны равными для любых двух различных фокусных расстояний), то очевидно, что это оказывается возможным только в том случае, если аберрации, вносимые каждым отдельным компонентом, изменяются незначительно при смещении

подвижных компонентов. Это в свою очередь требует, чтобы абберации (относительные поперечные), вносимые каждым из компонентов передней части панкратической системы, были относительно малы. Поэтому удовлетворительное исправление системы на всем интервале изменения фокусного расстояния оказывается возможным только в том случае, если каждый из компонентов рассчитывается таким образом, чтобы величины вносимых им аббераций были относительно малы и, кроме того, остаточные абберации переменной части системы были одинаковыми для максимально возможного числа точек.

Сложность и трудоемкость процесса абберационной коррекции оптической системы (и особенно панкратической) обусловили широкое внедрение ЭЦВМ в практику абберационного расчета. Есть работы, посвященные и автоматическому расчету панкратических систем в области аббераций третьего порядка [34]. Е. С. Полтыревой, И. П. Поляковой и М. Д. Серегиной (ГОИ) разработана программа для ЭЦВМ «Урал-2», которая позволяет провести абберационный расчет панкратической системы в области аббераций третьего порядка. С помощью этой программы составляются уравнения аббераций третьего порядка для системы с известными гауссовыми элементами (полученными в результате габаритного расчета) и определяются оптимальные параметры  $P$ ,  $W$ ,  $C$  компонентов. Программа предназначена для расчета панкратических объективов и оборачивающих систем.

Для исправления монохроматических аббераций третьего порядка  $n$ -компонентных панкратических систем имеем  $2n$  параметров. Этого числа параметров (особенно в малокомпонентных системах) обычно недостаточно для обеспечения хорошего исправления аббераций на всем диапазоне изменения увеличений. Поэтому необходим тщательный анализ уравнений аббераций третьего порядка при нескольких (5—7) положениях подвижных компонентов панкратической системы для того, чтобы выбрать оптимальные значения их основных параметров  $P$ ,  $W$ ,  $C$ . От правильного выбора этих параметров во многом зависит качество изображения системы.

В основу программы положены формулы аббераций третьего порядка, выраженные через

$$\delta g'_{I} = -\frac{1}{2} u'^3 S_I; \quad \delta g'_{II} = -\frac{3}{2} u'^2 w S_{II};$$

$$\delta g'_{III} = -u' w^2 S_{III}; \quad \delta g'_V = -\frac{1}{2} w^3 S_V;$$

$$\gamma_{g_{I \text{ xp}}} = 0,707 u S_{I \text{ xp}}; \quad \delta g'_{II \text{ xp}} = \frac{y'}{J},$$

где  $u'$  — апертурный угол в пространстве изображений;  $w$  — угол поля зрения в пространстве предметов.

Суммы Зейделя вычисляются по формулам:

$$S_I = \sum_{i=1}^n h_i P_i; \quad S_{II} = \sum_{i=1}^n H_i P_i - J \sum_{i=1}^n W_i;$$

$$S_{III} = \sum_{i=1}^n \frac{H_i^2}{h_i} P_i - 2J \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{h_i} W_i + J^2 \sum_{i=1}^n \Phi_i;$$

$$S_V = \sum_{i=1}^n \frac{H_i^3}{h_i^2} P_i - 3J \sum_{i=1}^n \frac{H_i^2}{h_i^2} W_i + J^2 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{h_i} \Phi_i (3 + \pi_i);$$

$$S_{I \text{ xp}} = \sum_{i=1}^n h_i^2 \Phi_i C_i; \quad S_{II \text{ xp}} = \sum_{i=1}^n h_i H_i \Phi_i C_i,$$

где  $h_i$ ,  $H_i$  — высоты пересечения первого и второго парааксиальных лучей с компонентами системы;  $\Phi_i$  — оптическая сила компонента;  $J$  — инвариант Лагранжа — Гельмгольца;  $\pi_i$  — коэффициент, определяющий кривизну поверхности изображения;

$$P_i = (\alpha_{i+1} - \alpha_i)^3 P_i + 4\alpha_i (\alpha_{i+1} - \alpha_i)^2 W_i + \\ + \alpha_i (\alpha_{i+1} - \alpha_i) [2\alpha_i (2 + \pi_i) - \alpha_{i+1}];$$

$$W_i = (\alpha_{i+1} - \alpha_i)^2 W_i + \alpha_i (\alpha_{i+1} - \alpha_i) (2 + \pi_i);$$

$\alpha_i$  — углы, образуемые первым вспомогательным лучом с оптической осью.

Вычисления по этим формулам выполняются при нижеследующих условиях:

$\alpha_{n+1} = 1$ ;  $h_1 = f_1$  (если  $\alpha_1 = 0$ );  $h_1 = a_1 \alpha_1$  (если  $\alpha_1 \neq 0$ );  $H_1 = x_1 \beta_1$ , где  $\beta_1$  — угол второго парааксиального луча, равный 1.

Для проведения расчета должны быть заданы следующие величины:

фокусные расстояния компонентов  $f'_k$ ;

значения  $\pi_k$  для каждого компонента;

расстояния  $d_k$  между главными плоскостями компонентов для каждого положения подвижных компонентов;

величины  $a_1 = x_{10} + f_1$  — расстояние ПП от главной плоскости первого компонента в случае, если предмет находится на конечном расстоянии от системы;

величина  $x_1$  — удаление плоскости входного зрачка системы от главной плоскости первого компонента; если апертурная диафрагма расположена внутри системы (или за системой), задается расстояние диафрагмы от предшествующего ей компонента;

координаты крайнего луча из осевой точки предмета в пространстве предметов:

а) при  $a_1 = \infty$  задается  $m_1$  — координаты точки пересечения луча с плоскостью входного зрачка;

б) при  $a_1 \neq \infty$  задается апертурный угол в пространстве предметов  $u_1$ ;

координаты главного луча из крайней точки предмета:

а) при  $a_1 = \infty$  задается угол поля зрения в пространстве предметов  $\omega$  или  $y'$ ;

б) при  $a_1 \neq \infty$  задается  $y'$  или  $u_1$ ;

величины требуемых поперечных аберраций

$$\delta g'_I, \delta g'_{II}, \delta g'_{III}, \delta g'_V, \delta g'_{I \text{ xp}}, \delta g'_{II \text{ xp}}.$$

Конструктор может задавать для каждого из выбранных положений подвижных компонентов любой набор аберраций, для которых составляются уравнения и находятся параметры  $P$ ,  $W$ ,  $C$  компонентов системы, причем число уравнений может быть больше числа неизвестных параметров или равно ему; по найденным значениям параметров  $P$ ,  $W$ ,  $C$  ЭЦВМ выполняет расчет всех аберраций третьего порядка для всех указанных положений.

В результате расчета определяются и печатаются следующие величины:

высоты крайнего и главного лучей, вычисленные по формулам Гаусса для каждого компонента, и углы между этими лучами и оптической осью; полученные данные используют при расчете сложных панкратических систем, так как они позволяют оценить условия, в которых работает каждый компонент системы, и правильно выбрать тип компонента;

коэффициенты уравнений аберраций третьего порядка при  $P$ ,  $W$ ,  $C$  подвижных компонентов системы в заданных положениях;

основные параметры компонентов  $P$ ,  $W$ ,  $C$ ;

значения аберраций третьего порядка при всех положениях подвижных компонентов, вычисленные по найденным  $P$ ,  $W$ ,  $C$ .

В программе предусмотрена минимизация параметров  $P$ ,  $W$ ,  $C$  методом Жирара [40], т.е. последовательным введением ряда значений коэффициента  $K$ . Для каждой системы коэффициент  $K$  подбирают эмпирически. При удачном выборе значения коэффициента  $K$  удается получить системы со значениями параметров  $P$ ,  $W$ ,  $C$ , которые могут быть реализованы.

Составленной программой удобно пользоваться, если компоненты панкратической системы представляют собой сложные системы, состоящие из ряда бесконечно тонких элементов, расположенных на малых или значительных расстояниях один от другого, например телеобъективы. В этом случае определяются основные параметры всех элементов системы.

Вопрос аберрационной коррекции панкратических систем самый сложный в вычислительной оптике; он довольно сложен и неопределен даже для объективов с постоянным фокусным расстоянием.

На практике при моделировании панкратических систем, их создании с использованием готовых объективов изложенные в настоящем параграфе сведения, по нашему мнению, могут помочь конструктору в выборе отдельных компонентов панкратических систем. Кроме того, общие требования к габаритному расчету, обусловленные возможностями аберрационной коррекции системы, могут подсказать расчетчику, какие системы следует анализировать.

Анализ результатов расчета панкратических систем на ЭЦВМ позволяет сделать в этом отношении некоторые рекомендации.

Если требуется построить систему, компоненты которой имеют малые относительные отверстия, то параметры этой системы следует искать в области малых  $\delta$ , т.е. больших смещений плоскости изображения; увеличение фокусных расстояний компонентов (одного или нескольких) можно провести, используя  $i_1 < 1$ .

Фокусные расстояния компонентов можно выравнивать (обеспечить примерное постоянство отношений фокусных расстояний), анализируя случаи малых  $|i| \leq 0,20 \div 0,25$  или вводя перемещение компонентов (например, в трехкомпонентной системе от случая  $i_0 = i_2 = 0$  и  $i_1 = i_3 = 1$  перейти к случаю с  $i_4 = 0$ , а  $i_2 \neq 0$ ).

## КОНСТРУИРОВАНИЕ ПАНКРАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

### 1. ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Телескопические панкратические системы находят широкое применение в науке и технике (наблюдательные приборы, осветительные лазерные системы и т. д.). Телескопическая панкратическая система (рис. 45) состоит из объектива, панкратической системы и компонента, необходимого для получения телецентрического хода лучей в выходном зрачке системы (для зрительных труб — это окуляр). Панкратическая система, помимо своего основного назначения, может выполнять еще ряд функций (быть оборачивающей системой зрительной трубы и т. д.).

В настоящее время в связи с бурным развитием лазерной техники телескопические системы находят широкое применение для уменьшения расходимости выходящего из ОКГ излучения. В некоторых приборах (светолокационные лазерные дальномеры и др.) возникает необходимость в регулировании угла расходимости излучения, направляемого на объект, для более эффективного использования мощности излучения ОКГ. В лазерных дальномерах с помощью телескопической панкратической системы узконаправленный пучок света можно сконцентрировать на различные расстояния, используя практически всегда полностью всю энергию.

Проведем расчет панкратической телескопической системы, работающей с ОКГ [24]. Оптическая схема такой системы в общем виде представлена на рис. 45. Так как угол расходимости выходящего из лазера излучения мал, то габаритный расчет системы удобно проводить для осевого пучка.

Для осевого пучка при отсутствии виньетирования световой диаметр последнего компонента

$$D = d \frac{f'_n}{f'_{\text{ЭКВ}}},$$

где  $f'_n$  — фокусное расстояние последнего компонента;  $f'_{\text{ЭКВ}}$  — эквивалентное фокусное расстояние объектива, включающего панкратическую систему.

Эквивалентное фокусное расстояние

$$f'_{\text{ЭКВ}} = f'_1 \beta_{\text{СПУ}}, \quad (101)$$

где  $f'_1$  — фокусное расстояние первого компонента;  $\beta_{\text{СПУ}}$  — увеличение панкратической системы.

Учитывая (101), имеем

$$D = d \frac{f'_n}{f'_1 \beta_{\text{СПУ}}} . \quad (102)$$

Установим, как изменяется расходимость осевого пучка на выходе из телескопической системы при наличии смещения плоско-

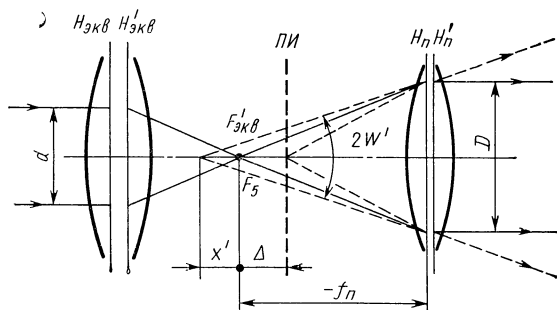


Рис. 45. Схема телескопической панкратической системы

сти изображения относительно первоначального положения (передний фокус последнего компонента) и при использовании в качестве панкратической системы с линейной связью между перемещениями компонентов. Из рис. 45, учитывая, что  $x' = -f'_n/\Delta$ , имеем

$$2W' = \frac{D}{f'_n + x'} = - \frac{\Delta D}{f_n^2 \left( 1 + \frac{\Delta}{f_n} \right)} . \quad (103)$$

Так как обычно  $\Delta/f'_n$  — величина малая, то выражение (103) упрощается, и  $2W' = -\Delta D/f_n^2$ . Подставив в это выражение значение  $D$  из (102), получаем

$$2W' = - \frac{\Delta d}{f'_1 \beta_{\text{СПУ}} f'_n} . \quad (104)$$

Далее будем считать для определенности, что в качестве панкратической используется трехкомпонентная система с линейной связью между перемещениями компонентов (рис. 46). Смещение плоскости изображения в этом случае определяется выражением [52]

$$\Delta = \frac{F(m)}{\delta(m)} = \frac{m^4 + c_3^{(3)}m^3 + c_2^{(3)}m^2 + c_1^{(3)}m}{\frac{m^3}{i_3} + d_2^{(3)}m^2 + d_1^{(3)}m + d_0^{(3)}}. \quad (105)$$

С учетом (105) выражение (104) запишется так:

$$2W' = \frac{dF(m)}{f_1' \beta_{\text{СПУ}} f_5' \delta(m)}.$$

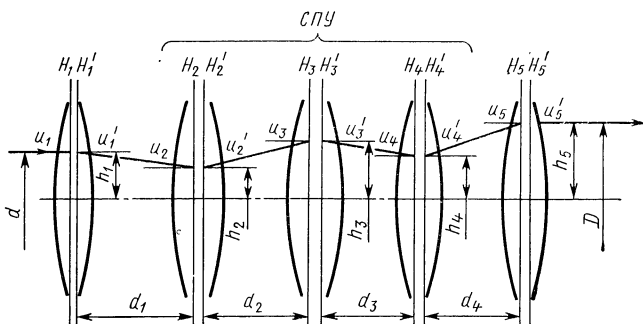


Рис. 46. Панкратическая телескопическая система ОКГ

На основании (55) увеличение трехкомпонентной СПУ

$$\beta_{\text{СПУ}} = - \frac{f_2 f_3 f_4}{\frac{m^3}{i_3} + d_2^{(3)}m^2 + d_1^{(3)}m + d_0^{(3)}} = - \frac{f_2 f_3 f_4}{\delta(m)}, \quad (106)$$

и выражение (106) для угла расходимости выходящего светового пучка записывается в виде

$$2W' = \frac{dF(m)}{f_1' f_2 f_3 f_4 f_5'}. \quad (107)$$

Если обозначить  $\frac{d}{f_1' f_2 f_3 f_4 f_5'}$  через  $k$ , то выражение для расходимости можно записать так

$$2W' = kF(m). \quad (108)$$

Исходя из условия обеспечения заданного перепада увеличений оптической системы и зная величины полного увеличения  $\Gamma_{\text{max}}$  и  $\Gamma_{\text{min}}$ , можно определить фокусные расстояния первого и пятого компонентов  $f_1'$ ,  $f_5'$ , обеспечивающие максимальную допустимую расходимость осевого пучка.



Так как увеличение всей системы (рис. 49)

$$\Gamma = -\frac{f'_1}{f'_5} \beta_{\text{СПУ}} = -\frac{f'_{\text{экв}}}{f'_5} = \frac{d}{D} \quad (109)$$

и из условия заданной расходимости  $2W'$  светового пучка на выходе системы коэффициент  $k$  определяется как

$$k = \frac{2W'}{F(m)}, \quad (110)$$

то фокусные расстояния первого и пятого компонентов можно найти, решая совместно уравнения (109) и (110). Световой диаметр пятого компонента, обеспечивающий отсутствие виньетирования осевого пучка, рассчитывают по формуле

$$D = \frac{d}{\Gamma_{\min}}.$$

Определим относительные отверстия каждого компонента системы при условии отсутствия виньетирования.

Для параксиального луча, проходящего через систему преломляющих поверхностей, имеем

$$\begin{aligned} h_{k+1} &= h_k - d_k \operatorname{tg} u_{k+1}; \\ \operatorname{tg} u'_k &= \operatorname{tg} u_k + h_k \Phi_k; \\ \operatorname{tg} u_{k+1} &= \operatorname{tg} u'_k. \end{aligned} \quad (111)$$

Пусть световой луч падает на первый компонент системы под углом  $W$  на высоте  $h_1 = d/2$ . Тогда для луча, падающего на второй компонент,

$$h_2 = \frac{d}{2} - d_1 \left( W + \frac{d}{2f'_1} \right); \quad (112)$$

для луча, падающего на третий компонент,

$$h_3 = \frac{d}{2} (1 - d_2 \Phi_2) - \left( W + \frac{d}{2f'_1} \right) (d_1 + d_2 - d_1 d_2 \Phi_2); \quad (113)$$

для луча, падающего на четвертый компонент,

$$\begin{aligned} h_4 &= \frac{d}{2} [(1 - d_2 \Phi_2) - d_3 (\Phi_2 + \Phi_3 - d_2 \Phi_2 \Phi_3)] - \\ &- \left( W + \frac{d}{2f'_1} \right) [d_3 (1 - d_1 \Phi_2) + (1 - d_3 \Phi_3) (d_1 + d_2 - d_1 d_2 \Phi_2)]; \end{aligned} \quad (114)$$

для луча, падающего на пятый компонент,

$$h_5 = \frac{d}{2} [1 - d_4 (\Phi_3 + \Phi_4) + (1 - d_3 \Phi_3) (d_3 d_4 \Phi_2 \Phi_4 - d_3 \Phi_2) -$$

$$- (1 - d_4 \varphi_4) (d_3 \varphi_3 + d_2 \varphi_2)] - \left( W + \frac{d}{2f'_1} \right) \{ (d_1 + d_2) [1 - d_4 \varphi_4 (1 - d_3 \varphi_3)] + (d_3 + d_4) [1 - d_2 \varphi_3 - d_1 \varphi_3 (1 - d_2 \varphi_2)] - d_1 d_2 (d_2 + d_3) (1 - d_4 \varphi_4) - d_4 (d_1 \varphi_2 + d_3 \varphi_4) - d_1 d_2 d_3 d_4 \varphi_2 \varphi_3 \varphi_4 \}. \quad (115)$$

В частном случае для луча  $W=0$  при отсутствии виньетирования имеем

$$\begin{aligned} h_2 &= \frac{d}{2} \left( 1 - \frac{d_1}{f'_1} \right); \\ h_3 &= \frac{d}{2} \left( 1 - \frac{d_1}{f'_1} \right) (1 - d_2 \varphi_2) - \frac{d d_2}{2 f'_1}; \\ h_4 &= \frac{d}{2} \left( 1 - \frac{d_1}{f'_1} \right) [1 - d_2 \varphi_2 - d_3 (\varphi_2 + \varphi_3 - d_2 \varphi_2 \varphi_3)] - \\ &\quad - \frac{d}{2 f'_1} [d_2 + d_3 (1 - d_2 \varphi_3)]; \\ h_5 &= \frac{d}{2} \left( 1 - \frac{d_1}{f'_1} \right) \{ (1 - d_2 \varphi_2) (1 + d_4 \varphi_4) - (\varphi_2 + \varphi_3 - d_2 \varphi_2 \varphi_3) \times \\ &\quad \times [d_3 + d_4 (1 - d_3 \varphi_4)] - \frac{d}{2 f'_1} \{ (1 - d_2 \varphi_3) [d_3 (1 + \varphi_4) - 1] + \\ &\quad + d_2 (1 + \varphi_4) \}. \end{aligned} \quad (116)$$

Таким образом, по формулам (107), (108) можно определить расходимость осевого пучка, обусловленную смещением плоскости изображения, а по формулам (111)–(116) световые диаметры, а следовательно, и относительные отверстия каждого компонента панкратической телескопической системы, обеспечивающие отсутствие виньетирования пучка.

В качестве примера рассмотрим реальную телескопическую систему ( $\Gamma=0,859 \div 0,0859$ ) с трехкомпонентной панкратической системой с линейной связью между перемещениями компонентов, в которой неподвижна предметная плоскость ( $i_0=0$ ) и второй компонент ( $i_2=0$ ).

Перепад увеличений системы  $M=10$ ;  $\delta=-5$ ;  $i=1$ ;  $d_2^{(3)} = -30$ ;  $c_3^{(3)} = 0$ ;  $c_1^{(3)} = 0$ ;  $c_2^3 = -1/4$ ;  $-1/2 \leq m \leq 1/2$ ;  $-0,0385 \geq \beta_{\text{СПУ}} \geq -0,385$ .

Параметры системы, мм:  $x'_{30} = -3000$ ;  $d_{20} = -2845,32$ ;  $d_{10} = -66,57$ ;  $x_0 = 88,09$ ;  $f'_4 = 2924$ ;  $f'_3 = 19,29$ ;  $f'_2 = -34,06$ ;  $f'_1 = -313,5$ ;  $f'_5 = 140$ .

Расходимость осевого пучка, обусловленная смещением ПИ, определяется в данном случае для  $d=8$  мм по формуле:  $2W'=0,95 (m^4-0,25 m^2)$ . Максимальное значение угла расходимости  $2W=31''$  и имеет место при  $m=\pm 0,345$ .

Расходимость светового пучка на выходе системы можно уменьшить в 2 раза («располовинить»), сместив ПИ от переднего фокуса пятого компонента на величину  $\Delta_{\max}/2$ . Относительные отверстия компонентов данной системы имеют следующие значения:  $A_1=1:39,4$ ;  $A_2=1:7,75$ ;  $A_3=1:1,3$ ;  $A_4=1:1,45$ ;  $A_5=1:1,52$ .

При выборе панкратической системы следует иметь в виду, что более предпочтительной (особенно при больших мощностях ОКГ) является система, не имеющая промежуточного изображения. Для уменьшения расходимости, обусловленной смещением ПИ, фокус последнего компонента следует выбирать достаточно большим, что всегда осуществимо при  $|\beta_{\text{СПУ}}| < 1$ . Системы, параметры которых приведены в табл. 16—18, практически все имеют увеличение, меньшее единицы, и с этой точки зрения удобны для использования в телескопических панкратических системах ОКГ.

В ряде приборов панкратическая система должна также выполнять роль и оборачивающей системы (зрительные трубы, прицельные устройства и др.). В этом случае увеличение панкратической системы должно быть отрицательным, что возможно только при определенном сочетании положительных и отрицательных компонентов в соответствии с формулами (27), (55) и (98). Поэтому при расчете панкратической оборачивающей системы или выборе ее по таблицам необходимо учитывать это требование.

В качестве оборачивающих систем можно применять и трехкомпонентные панкратические системы, рассмотренные в п. 4 гл. 1. По табл. 16—18 можно выбрать системы, для которых увеличение отрицательно, и использовать их в качестве оборачивающих. Наиболее рационально выбирать симметричные системы с  $i_3=1$ , для которых  $f_1^2=f_2^2$  и  $\beta_{\max}=1/\beta_{\min}$  (табл. 9,10), так как эти системы имеют наилучшие свойства [27].

Для определения гауссовых элементов панкратических оборачивающих систем можно применять автоматический способ, разработанный в ГОИ [33]. В основу расчета положен способ Бергстейна [51]. Полученные по этой методике системы (с  $i_3=1$ ) близки к рассмотренным нами симметричным системам, и для них выполнено условие  $\beta_{\max}=1/\beta_{\min}$ . В табл. 20 приведены гауссовы параметры трехкомпонентных оборачивающих панкратических систем, рассчитанных с помощью программы, составленной для ЭЦВМ «Урал-2» [33] при  $m=0 \div 1$ .

В [33] также приведены гауссовы параметры пятикомпонентных панкратических оборачивающих систем для случая  $i_0=i_2=i_4=0$  и  $i_1=i_3=i_5=1$  при условии, что увеличение изменяется в пределах от  $\beta_{\max}=-\sqrt{M}$  до  $\beta_{\min}=1/\sqrt{M}$ . Расчет выполнен на ЭЦВМ «Урал-2» по программе, составленной в ГОИ [33], с использованием методики Бергстейна. Следует отметить, что эта методика сложна уже для рассмотренного частного случая пятикомпонентных систем [33]. Методика расчета, предлагаемая автором, симметричных систем (такого же типа, как рассмотренные в [27]) проста и удобна для расчета.

Таблица 20

$M$	$D_1$	$D_2$	$f'_1$	$f'_2$	$f'_3$	$a_1$	$a'$	$\Delta_{\max}$
4	0,15	1,15398	1,61883	-0,98197	1,58468	-3,69694	4,520	0,003
	0,40	1,52305	1,73607	-0,91155	1,64452	-3,92614	4,6722	0,003
	0,15	1,15022	-1,30764	1,34117	-1,27606	4,10897	-2,9783	0,004
	0,40	1,37771	-1,26626	1,41729	-1,22431	4,03347	-2,8803	0,004
6	0,15	1,16750	1,30451	-0,71521	1,25472	-2,88883	3,7071	0,007
	0,40	1,67491	1,48349	-0,63689	1,30882	-3,24215	3,8030	0,007
	0,15	1,15210	-0,98570	1,07584	-0,94611	3,28675	-2,1246	0,008
	0,40	1,38182	-0,94629	1,15525	-0,89744	3,21544	-2,0330	0,008
8	0,15	1,18261	1,16119	-0,58807	1,09787	-2,52167	3,3034	0,010
	0,40	1,85524	1,41523	-0,50131	1,14582	-3,02555	3,3847	0,010
	0,15	1,15290	-0,83463	0,95009	-0,78931	2,90498	-1,7222	0,011
	0,40	1,38388	-0,79671	1,03178	-0,74275	2,83686	-1,6351	-0,012
10	0,15	1,19397	1,07664	-0,51118	1,00319	-2,30588	3,0613	0,012
	0,40	2,04508	1,41354	-0,41688	1,04581	-2,97578	3,1301	0,012
	0,15	1,15336	-0,74403	0,87410	-0,69436	2,67787	-1,4806	0,015
	0,40	1,38373	-0,70780	0,95732	-0,64922	2,61332	-1,3965	-0,015
20	0,15	1,18800	0,88592	-0,34843	0,80288	-1,83026	2,5553	0,020
	0,40	2,94397	1,66035	-0,23269	0,83220	-3,37509	2,5941	0,021
	0,15	1,15105	-0,55208	0,70968	-0,48839	2,20253	-0,9666	0,026
	0,40	1,36330	-0,52652	0,79502	-0,44544	2,16058	-0,8869	-0,028

## 2. ПАНКРАТИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТИВЫ

Панкратические объективы делят на два класса: вариообъективы и трансфокаторы. Вариообъективом называют объектив, а котором непрерывное изменение фокусного расстояния осуществляется за счет непрерывного перемещения одного или нескольких компонентов вдоль оптической оси.

Трансфокаторами называют совокупность афокальной панкратической насадки, угловое увеличение которой может непрерывно изменяться в заданных пределах, и объектива с постоянным фокусным расстоянием. Афокальная панкратическая насадка плюс объектив представляют собой объектив с переменным фокусным расстоянием  $f' = \Gamma f'_0$ , где  $\Gamma$  — угловое увеличение насадки;  $f'_0$  — фокусное расстояние объектива, располагающегося за насадкой. Афокальную насадку обычно устанавливают таким образом, что ее выходной зрачок совпадает с входным зрачком объектива. Относительное отверстие всей системы, как правило, постоянно при всех значениях фокусного расстояния и определяется отношением диаметра  $p$  диафрагмы, установленной в плоскости зрачка, к фокусному расстоянию объектива  $f'_0$ , т. е.  $p/f'_0 = 1:n$ , где  $n$  — числовое значение знаменателя относительного отверстия

В настоящее время и вариообъективы, и трансфокаторы находят широкое применение в науке и технике (киносьемочная аппаратура, фотоаппараты, телевидение и т. д.). Следует отметить, что вариообъективы по сравнению с трансфокаторами (с одинаковыми характеристиками) имеют значительно меньшие размеры и с этой точки зрения предпочтительны. Однако трансфокаторы имеют и свое преимущество: если aberrации телескопической панкратической насадки, входящей в трансфокатор, исправлены, то ее можно применять вместе с различными объективами, aberrации которых исправлены на бесконечность, что позволяет значительно расширить диапазон изменения фокусного расстояния системы [14].

В зависимости от кинематики перемещения компонентов вариообъективы и трансфокаторы могут иметь механическую или оптическую компенсацию смещения ПИ, могут быть линзовыми, зеркальными или зеркально-линзовыми.

Появление панкратических объективов с оптической компенсацией относится к 30-м годам нашего столетия. Первоначально это были очень простые схемы, которые не обеспечивали хорошее качество изображения и применялись в основном в проекционных приборах.

Первый панкратический фотообъектив с оптической компенсацией «Зуммар» был создан Бэком в 1947 г. Этот объектив состоял из пяти положительных групп линз, причем вторая и четвертая жестко соединены и перемещаются по линейному закону [3]. Независимо от этого в 1947 г. во Франции был изготовлен объектив «Пан-Синор» [7, 14]. Несмотря на многие недостатки, которые были присущи первоначальным моделям, объектив «Пан-Синор» оказался лучше «Зуммара» и вскоре вытеснил его.

В то время как в кинематографии и телевидении панкратические объективы получили уже весьма широкое распространение, рациональность их применения в фотоаппаратах долгое время ставилась под сомнение.

Вследствие жесткости ограничений, накладываемых на размеры фотообъектива, а также сложности расчета сложных широкоугольных систем, обусловленной коррекцией дисторсии, создание хорошего фотообъектива оказалось возможным только с внедрением в практику расчета оптических систем ЭЦВМ. Появление значительного числа панкратических объективов, имеющих новые оригинальные оптические системы, относится к середине 50-х годов.

Первый фотообъектив, получивший мировое признание, — «Фойхтлендер-Зуммар» ( $f' = 36 \div 82$  мм) появился в 1959 г. [7]. Аналогичный объектив «Рубин-1» был рассчитан в ГОИ и изготовлен в СССР в 1963 г. [ $f' = (37 \div 80)$  мм; относительное отверстие 1:2,8]. Это пятигрупповой объектив с оптической компенсацией. Вторая и четвертая положительные группы линз жестко связаны между собой и перемещаются по линейному закону; первая и третья — отрицательные неподвижные группы линз; пятая — шестилинзовая положительная группа линз.

Не останавливаясь подробно на истории создания панкратических объективов [3, 6, 37], рассмотрим современное состояние развития этих устройств.

На 1 января 1972 г. зарубежные фирмы предлагали 109 различных моделей панкратических объективов для малоформатных фотокамер с диапазоном изменения фокусных расстояний от 30 до 4000 мм и перепадом увеличений в подавляющем большинстве от

1,8 до 3. Ведущее место в производстве панкратических объективов занимают фирмы Японии, ФРГ, США, Англии, Франции. Фирмы Японии производят около 70 образцов различных фотообъективов, которые отличаются в основном оригинальностью схем и конструкций. Фирмы ФРГ выпускают 15 образцов, США — 20 образцов. Количество выпускаемых фотообъективов с каждым годом увеличивается. Однако стоимость панкратических объективов выше, чем стоимость сменных объективов.

Панкратические объективы, подобно фотообъективам с постоянным фокусным расстоянием, классифицируют исходя из величин их минимальных фокусных расстояний [6] и делят на (табл. 21):

- 1) широкоугольные панкратические объективы, у которых минимальное фокусное расстояние  $f'_{\min}$  не превышает 45 мм;
- 2) нормальные (универсальные) панкратические объективы с  $f'_{\min} = 45 \div 60$  мм;
- 3) длиннофокусные панкратические объективы с  $f'_{\min} = 70 \div 100$  мм;
- 4) особо длиннофокусные панкратические объективы с  $f'_{\min}$  выше 150 мм.

Оптические характеристики панкратических объективов — кратность и пределы абсолютных значений изменения фокусных расстояний, относительные отверстия и углы поля зрения — целиком зависят от числа компонентов, входящих в систему, и ее размеров. Например, если светосильные малогабаритные системы с двух-трехкратным изменением фокусных расстояний содержат 10—13 линз, то объективы с широким интервалом изменения фокусных расстояний (восьми-десятикратным) содержат 16—18 и более линз в зависимости от требований к качеству коррекции aberrаций.

Анализ лучших современных панкратических объективов, выполненный М. Шпакимым, показал, что между их оптическими характеристиками и габаритными размерами существует приближенная зависимость [6]

$$\frac{f'_{\max} \varepsilon}{L_c - \frac{1,2 f'_{\max}}{\sqrt{M}}} = C,$$

где  $f'_{\max}$  — максимальное фокусное расстояние системы;  $\varepsilon$  — относительное отверстие;  $M$  — кратность измерения фокусных расстояний;  $L_c$  — общая длина системы. Константа  $C$  в известной степени характеризует добротность системы и у наилучших современных объективов имеет значение около 0,4. Это выражение для  $C$  позволяет в первом приближении выбрать оптические характеристики и габаритные размеры панкратических объективов.

Объективы, представленные в табл. 21, линзовые. Однако широкое внедрение оптических систем в различные области науки и техники (пирометрия, инфракрасная техника и т. д.) обусловлено необходимостью применения зеркальных и зеркально-линзовых объективов, позволяющих значительно расширить спектральный диапазон используемого излучения.

Марка объектива	Пределы изменения фокусного расстояния, мм	Относительное отверстие	Кратность M	Тип компенсации	Число линз	Габаритные размеры, мм		
						Длина	Максимальный диаметр	Масса, кг
Широкоугольные панкратические объективы для фотоаппаратов								
«Фойхтлендер-Зуммар» (ФРГ—США)	36—82	—	2,3	Оптическая	14	120	78	0,8
«Ауто-Никкор-Зум» (Япония)	35—85	—	2,4	—	13	—	—	—
«Зумалик» (Франция)	35—75	1:2,8	2,1	Механическая	15	—	—	—
«Рубин-1» (СССР)	37—80	—	2,2	Оптическая	14	120	78	0,8
«Цейс-Варио-Зоннар» (ФРГ)	40—120	—	3	—	13	175	90	1,8
«Ауто-Никкор-Зум» (Япония)	43—86	—	2	Механическая	9	100	67	0,4
«Рубин-2а» (СССР)	45—80	—	1,8	»	10	110	64	—
«Полорис-Ауто-Зум» (ФРГ)	45—135	1:3,5	3	—	—	—	—	—
«Мейбо-Зум» (Япония)	35—100	—	2,9	Механическая	—	—	—	—
Нормальные панкратические фотообъективы								
«Канон-Зум» (Япония)	45—200	—	4,5	Механическая	13	—	—	—
«Шнейдер-Вариогон» (ФРГ)	45—100	1:2,8	2,2	—	—	—	—	—
«Кonica-Гексанон» (Япония)	47—100	—	2,1	—	—	100	58	0,85
«Роккор-Ауто-Зум» (Япония)	50—100	1:3,5	2	—	14	125	78	2,75
«Анжелье-Зум» (Франция)	50—200	—	4	Механическая	—	—	—	1,2
«Зум-Биокор» (Япония)	50—100	1:3	2	»	—	170	—	—
«Ауто-Никкор-Зум» (Япония)	50—300	1:4,5	6	—	14	300	103	2,1
«Тайрон-Зум» (Япония)	55—90	1:4	1,6	—	7	115	70	0,60
«Канонматик-Зум» (Япония)	55—135	1:3,5	2,4	Механическая	13	140	85	0,77

Длиннофокусные панкратические фотообъективы

«Супер-Такумор-Зум» (Япония)	70—150	1:4,5	2,1	—	15	225	70	1,1
«Рокор-Ауто-Зум» (Япония)	80—160	1:3,5	2	Механическая	—	210	80	1,3
«Солигор-Миранда-Зум» (Япония)	90—140	1:2,8	1,6	—	11	165	—	1,02
«Петри-Ауто-Зум» (Япония)	80—200	1:4,5	2,5	Механическая	—	—	—	—
«Шнайдер-Вариогон» (ФРГ)	80—240	1:4	3	»	14	200	97	1,65
«Тамрон-Зум» (Япония)	80—250	1:3,8	3,2	—	—	240	72	1,26
«Сан-Хи-Теле-Зум» (Япония)	85—210	1:4,8	2,5	Механическая	13	164	58	0,67
«Шейсс-Варио-Зоннар» (ФРГ)	85—250	1:4	2,9	—	15	260	90	2,3
«Энна-Теле-Зум» (ФРГ)	85—250	1:5,8	—	—	12	190	83	1,2
«Ауто-Никкор-Теле-Зум»	85—300	1:5	3,5	Оптическая	15	300	105	1,8
«Канон-Зум» (Япония)	90—190	1:5,8	—	—	9	270	78	1,7
«Ясика-Ясинон-Зум» (Япония)	95—205	1:6,3	2,1	Оптическая	—	170	56	0,55
«Эдиксар-Зум» (Япония)	95—250	1:5,6	—	—	7	185	61	0,63
«Тамрон-Зум» (Япония)	100—200	—	—	—	9	200	56	0,55
«Тамрон-Зум» (Япония)	100—200	—	—	—	—	180	62	0,72
«Калигар-Зум» (Япония)	100—200	—	—	—	7	175	58	0,63
«Минокльта-Роккор-Зум» (Япония)	100—200	—	—	—	—	190	55	0,54
«Бауэр-Теле-Зум» (Япония)	100—200	—	2	—	—	—	70	0,9
«Йака-Теле-Зум» (Япония)	100—200	—	—	—	—	190	—	0,86
«Юплен-Зум» (Япония)	100—270	1:4,5	2,7	—	15	300	70	0,9
«Асахи-Супер-Такумор-Зум» (Япония)	110—180	1:4,5	1,6	—	9	180	—	1,1
«Сан-Теле-Зум» (Япония)	110—180	1:4,5	1,6	—	—	—	—	—

Панкратические объективы для телевизионных трубок оптикон и супероптикон

«Ангжене-Зум 10×35B» (Франция)	35—350	1:3,8	10	—	19	513	150	9,1
«Варотал-5» (Англия)	40—400	1:4	—	Механическая	16	407	142	—
«Варио-Гопр-17» (СССР)	68—800	1:6,4	12	—	18	403	140	—
«Ангжене-Зум 12×68 мм» (Франция)	63,5—1016	1:4—1:7,5	16	—	—	722	174	14,5
«Варотал-14» (Англия)	100—1000	1:4—1:8	10	—	—	720	178	18
«Варотал-3» (Англия)	80—800	1:4—1:8	—	—	13	650	—	15,3
«Алькор-6» (СССР)	80—800	1:4—1:8	—	—	15	529	—	9,2



Марка объектива	Пределы изменения фокусного расстояния, мм	Относительное отверстие	Кратность M	Тип компенсации	Число линз	Габаритные размеры, мм		
						Длина	Максимальный диаметр	Масса, кг
Панкратические объективы для телевизионных трубок "Видикон"								
«Анженье 10×15С» (Франция)	15—150	1:1,9	10	Механическая	—	280	—	—
«Анженье 10×15» (Франция)	16—160	1:2,8			—	209	—	—
«Варотал-7» (Англия)	20—200	1:2			—	—	—	—
«Варотал-8» (Англия)								
Особо длиннофокусные панкратические фотообъективы								
«Рокор-Ауто-Зум» (Япония)	160—500	1:8	3,1	Оптическая	16	490	90	2,75
«Сан-Хи-Теле-Зум» (Япония)	190—430	1:5,8	2,3		11	430	86	2,55
«Тамрон-Зум» (Япония)	200—400	1:6,3	2		8	350	81	1,28
«Ауто-Никкор-Теле-Зум» (Япония)	200—600	1:9,5—1:10,5	3		13	490	105	2,8
«Тамрон-Зум» (Япония)	1000—4000	1:16—1:64	4		14	447	—	1,4

Трансфокатор, мод. III «Идар-2» (СССР)	36-72 32-93	1:2,3 1:3,5	2 2,9	Механическая	8	—	—	—
«Фотон» (СССР)	37-140	1:5,3 1:3,5	3,8	»	6	—	—	—
ТФК-4 (СССР)	30-120	1:2,8	—	»	12	163	75	0,83
Трансфокатор «Пентовар» (ГДР)	35-140	1:2	—	»	16	—	—	—
«Анженье» (Франция)	38,5-154	1:3,5	4	»	14	—	—	—
«Пан-Синор», мод. 150 (Франция)	40-160	1:3,8	—	Оптическая	12	—	—	—
«Лена p-1» (СССР)	18-70	1:4,5	—	То же	16	230	86	1,56
«Лена p-2M» (СССР)	17-68	1:2,4	3,8	»	—	—	—	—
«Лена p-16M» (СССР)	15-60	1:1,9	—	Оптическая	18	—	—	—
«Метеор-5» (СССР)	17-68	1:2,8	4	»	—	—	—	—
«Пентовар 16-K» (ГДР)	25-100	1:2,2	—	Механическая	14	—	—	—
«Анженье» (Франция)	20-60	1:2,4	3	Оптическая	10	—	—	—
«Пан-Синор, мод. 100 (Франция)	30-120	1:5,6	4	Механическая	16	—	—	—
Трансфокатор «Астро»	17,5-70	1:2,4	—	»	15	—	—	—
«Пентовар» (ГДР)	17-85	1:2	5	Оптическая	—	—	—	—
«Пан-Синор, мод. 70 (Франция)	12-120	1:2,4	4	»	15	—	—	—
«Пан-Синор, мод. 85» (Франция)	9-36	1:2,4	4	—	16	—	—	—
«Варио-Гоир-1» (СССР)	9-36	1:1,7	4,1	—	18	—	—	—
«Метеор-2» (СССР)	9-37	1:1,4	8	—	13	—	—	—
«Метеор-4» (СССР)	7,5-32	1:1,8	4,9	—	—	—	—	—
ПФ-2 (СССР)	6,5-52	1:1,2	2,5	—	—	—	—	—
«Гранит-3» (СССР)	8,5-4,2	1:1,8	10	—	—	—	—	—
«Анженье-Зум» (Франция)	8-20	—	—	—	17	—	—	—
«Канон-Зум-Ленс С-8» (Япония)	9-23	—	—	—	9	—	—	—
«Ник-Корекс» (Япония)	6,6÷66	—	—	—	12	—	—	—
«Агат-6A» (СССР)	—	—	—	—	14	—	—	—
«Варио-Гоир-2» (СССР)	—	—	—	—	—	—	—	—

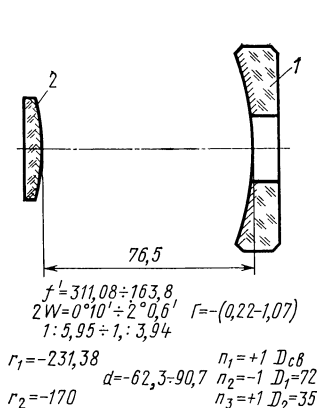


Рис. 47. Оптическая схема зеркального панкратического объектива

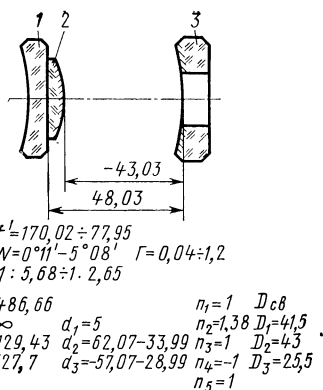


Рис. 48. Оптическая схема зеркально-линзового панкратического объектива

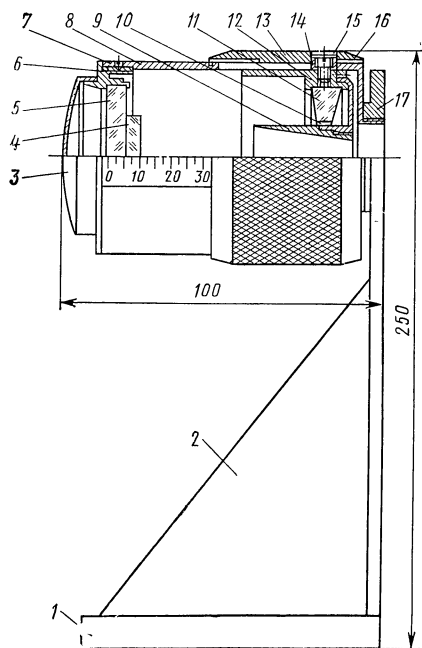


Рис. 49. Конструкция зеркально-линзового объектива:

Зеркальные объективы по сравнению с линзовыми системами имеют конструктивные преимущества: меньшие габаритные размеры и массу; получение асферических поверхностей (особенно с малыми отклонениями от сферы) более технологично и т. д. Наиболее целесообразно применение зеркальных систем для создания особо светосильных зеркальных объективов и особо длиннофокусных зеркальных или зеркально-линзовых телеобъективов. Нужно иметь в виду также, что во многих случаях необходимость применения зеркальных систем обусловлена свойствами излучения.

В настоящее время практически созданы только зеркальные и зеркально-линзовые объективы с постоянными фокусными расстояниями. Методику расчета панкратических систем, изложенную в п. 2—5 гл. 1, можно эффективно применить при создании зеркальных и зеркально-линзовых объективов. Первым опытом создания панкратических зеркальных и зеркально-линзовых объективов является разработка двух зеркального и трехкомпонентного зеркально-линзового объективов, предназначенных для использования в пиометрических системах, работающих с конечного расстояния<sup>1</sup>. На рис. 47 и 48 приведены их оптические схемы, а на рис. 49 показано конструктивное оформление трехкомпонентного зеркально-линзового объектива.

### **3. ПАНКРАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКИХ ИМИТАТОРОВ ТРЕНАЖЕРОВ**

В настоящее время в связи с бурным развитием ряда областей науки и техники (авиации, космической техники, транспортного машиностроения, военной техники и др.) интенсивно развивается тренажеростроение [12, 13]. Для воспроизведения визуальной обстановки, имитирующей окружающее пространство, в котором эксплуатируется данная машина (самолет, автомобиль, космический корабль и др.), в тренажерах используют оптические системы или телевизионные установки.

Наиболее полно весь объем необходимых операций, которые должны воспроизводиться оптической системой тренажера, можно проследить на примере авиационных тренажеров. В авиационных тренажерах необходима моделирующая установка для имитации относительного перемещения быстро движущихся объектов. Естественно, что наиболее полно условия тренировки и испытаний воспроизводятся при реальной эксплуатации той или иной аппаратуры. Однако в целом ряде случаев это связано с чрезвычайно большой затратой времени и средств. Применение для этих целей специального оборудования позволяет решить задачу значительно быстрее, проще и дешевле.

При решении задачи имитации видимой цели в тренировочных устройствах необходимо воспроизводить все относительные эволюции цели, наблюдаемые оператором в реальной обстановке. Для этого нужно моделировать: 1) изменение дальности до цели  $D$ ;

---

<sup>1</sup> Шикуть А. В., Пахомов И. И., Сычев В. В., Голубь Б. И. Двухзеркальный объектив. — «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1972, № 12, с. 173. Шикуть А. В., Пахомов И. И., Сычев В. В., Голубь Б. И. Зеркально-линзовый объектив. — «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1973, № 6, с. 101.

2) относительные перемещения центра тяжести цели и 3) повороты цели вокруг ее центра тяжести.

Один из возможных способов моделирования — оптическое проектирование объемной модели цели на экран тренажера с помощью панкратической системы, имитирующей изменение дальности до цели. Наблюдая через оптическую систему за маневрирующей целью, глаз оператора воспринимает изменение дальности цели как изменение ее видимых угловых размеров. Очевидно, что основным условием правильной имитации дальности является равен-

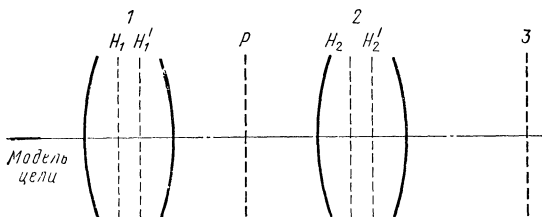


Рис. 50. Принципиальная оптическая схема имитатора цели

ство углового размера цели  $\delta_{ц}$ , видимого оператором в реальных условиях, угловому размеру  $\delta_{из}$  изображения цели на экране тренажера, т. е.  $\delta_{ц} = \delta_{из}$ . При выбранном коэффициенте геометрического подобия модели цели [13] и выбранных размерах экрана поперечное увеличение  $\beta$  проекционной системы имитатора цели должно быть обратно пропорционально дальности цели:

$$\beta = \frac{BR}{lD},$$

где  $R$  — радиус сферы экрана;  $l$  — база проектируемой модели цели;  $B$  — база цели.

Схематично оптическую систему рассматриваемого имитатора цели можно представить следующим образом (рис. 50). Изображение геометрически подобной модели цели, даваемое оптической системой 1, находится в плоскости  $P$ . Оптическая проекционная система 2 переносит изображение, рисуемое системой 1 в плоскости  $P$ , на экран 3 тренажера. Система 2 является в данном случае проекционной системой постоянного увеличения. В общем случае порядок расположения систем 1 и 2 может быть и иным (т. е. система постоянного увеличения располагается перед системой переменного увеличения, проектирующей изображение модели цели на экран).

Общее увеличение оптической системы имитатора

$$\beta = \beta_1 \beta_2,$$

где  $\beta_1$  — поперечное увеличение системы 1;  $\beta_2$  — поперечное увеличение системы 2.

В качестве панкратической системы (система 1 на рис. 50) может быть одно-, двух- и трехкомпонентная оптическая система.

В оптическом имитаторе «Луна», разработанном и построенном кафедрой оптических приборов МВТУ им. Баумана [12, 13], в качестве панкратической системы применена однокомпонентная система, в которой изменение увеличения осуществляется за счет перемещения предметной плоскости (в данном случае объемной модели цели) и компонента (объектива «Юпитер-3» с  $f'=52,4$  мм и относительным отверстием 1:1,5). Модель совершает возвратно-поступательное движение, а объектив — прямолинейное. Перепад увели-

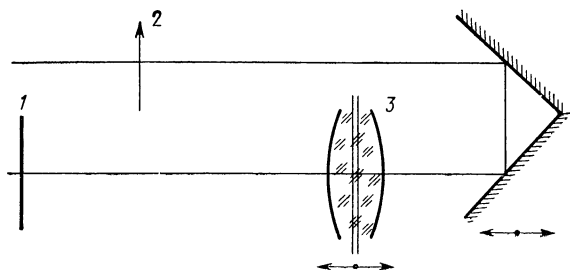


Рис. 51. Схема компенсации смещения ПП:

1 — экран; 2 — модель; 3 — объектив

чений в рассматриваемой системе  $M=10$ . В данном случае используется панкратическая система с механической компенсацией [13]. Система наряду с достоинствами (большой перепад увеличений  $M$ , малое число компонентов — один серийно выпускаемый фотообъектив «Юпитер-3») имеет и недостатки (сложное возвратно-поступательное перемещение громоздкого узла модели<sup>1</sup>, усложняющее конструкцию, и др.).

Общим недостатком однокомпонентных систем с перемещающейся плоскостью предметов являются, как правило, значительные габаритные размеры системы и большие перемещения элементов системы при больших перепадах масштаба увеличений. Поэтому рациональнее использовать двух- и трехкомпонентные панкратические системы, в которых предметная плоскость неподвижна, а компоненты перемещаются по линейному закону. Достоинство таких систем — простота кинематической схемы, обеспечивающей перемещение компонентов; меньшие габаритные размеры системы, возможность получения больших перепадов увеличений  $M=10\div 100$ ; большие возможности для абберационной коррекции системы, обусловленные наличием большего числа компонентов, и т. д. Так как в тренажерах глаз наблюдателя практически всегда находится на значительном расстоянии от экрана (1,5—4 м), то по возможности следует располагать панкратическую систему 1 (см. рис. 50) за системой 2. В этом случае кружок рассеяния, обусловленный смещением плоскости изображения из-за линейного закона переме-

<sup>1</sup> Плоскость предметов в однокомпонентной системе может быть сделана неподвижной за счет введения и перемещения дополнительной двухзеркальной системы, представленной на рис. 51. Такая схема дает выигрыш в перемещении (перемещение зеркал вдвое меньше перемещения модели), однако в связи с введением зеркал появляются дополнительные потери света.

щения компонентов, может быть сделан достаточно малым. В то же время, если система 2 располагается за панкратической системой, то смещение  $\Delta$  плоскости изображения в панкратической системе второй системой увеличивается в  $\beta_2^2$  раза [2], и при  $|\beta| > 1$  кружок рассеяния на экране будет увеличиваться.

В случае необходимости (недопустимые смещения ПИ) система с оптической компенсацией может быть выполнена с механической компенсацией путем введения компенсатора (рис. 52), в котором

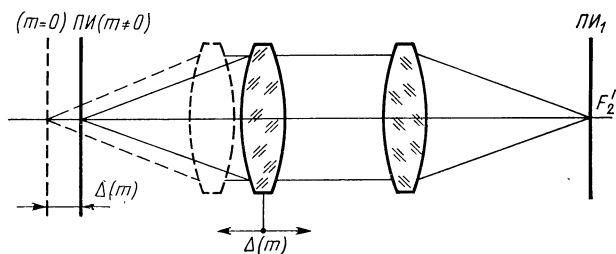


Рис. 52. Схема компенсации смещения ПИ

первый компонент перемещается по нелинейному закону [по закону перемещения плоскости изображения  $\Delta = \Delta(m)$ ], или путем перемещения одного из компонентов панкратической системы по нелинейному закону [по закону  $i = i(m)$ ].

Методика расчета панкратических систем с большим перепадом увеличений, изложенная в пп. 3, 4 гл. 1 может быть с успехом применена для расчета оптических имитаторов, обеспечивающих моделирование изменения дальности в широком диапазоне (перепад увеличений  $M$  в данном случае практически ограничивается теми возможностями, которые система имеет в отношении ее аберрационной коррекции).

Двухкомпонентные панкратические системы, обеспечивающие значительный перепад увеличений  $M$ , конструктивно более просты и предпочтительны в отношении световых характеристик.

В табл. 22 приведены гауссовы параметры панкратических систем с большим перепадом увеличений, рассчитанные по методике, изложенной в пп. 3, 4 гл. 1.

Для получения системы с большим перепадом увеличений  $M$  можно применять принцип сложения более простых систем переменного увеличения [45]. Полученные таким образом системы имеют большой перепад увеличений, однако размеры их велики (до 5 м), оптическая схема сложна.

Одним из возможных методов создания оптических имитаторов с большим изменением масштаба изображений является использование в системе панкратического объектива. При неподвижном объективе (перемещаются только его подвижные элементы) обеспечивается диапазон изменения масштаба изображений, равный перепаду фокусных расстояний самого панкратического объектива. Если дополнительно осуществлять перемещение всего панкрати-

Таблица 22

$M$	$i_2$	$x'_{20}$	$f_2^2$	$f_1^2$	$x_{10}$	$d_{10}$	$i_1$	$m$	$\Delta_{\max}$
25		0,275	0,474	0,40	1,43478	1,444		От -1,05 до +1,8	0,0369
28								От -1 до +2	0,05
45	0,1			0,1817	1,2727	2,4497	-1	От -1 до +3	0,1
100		0,35	0,9675					От -1,215 до +3	0,257
15								От -1 до +1	0,018

$M$	$i_3$	$x'_{30}$	$f_3^2$	$f_2^2$	$f_1^2$	$x_{10}$	$d_{10}$	$d_{20}$	$i_2$	$i_1$	$m$	$\Delta_{\max}$
19	1	-30	865	0,0372	0,1161	0,8809	0,6657	-28,45	0	1	От -1 до +0,5	0,005



ческого объектива, то диапазон изменения масштаба изображения может быть увеличен еще в несколько раз.

Системой переменного увеличения большой кратности может быть комбинированная оптико-телевизионная проекционная система, в которой для расширения диапазона увеличения используются последовательно работающие оптические и магнитные линзы с переменными фокусными расстояниями. Однако габаритные размеры и стоимость такой системы велики, эксплуатация сложна, а надежность несколько ниже оптико-механических систем.

В некоторых случаях можно использовать панкратические системы с нелинейной связью между перемещениями компонентов (или их комбинацию с системами с оптической компенсацией) для расширения диапазона изменения перепада увеличений и уменьшения смещения плоскости изображения  $\Delta$ .

Перспективным, с нашей точки зрения, является создание зеркальных и зеркально-линзовых панкратических систем, которые позволяют расширить перепад увеличений с одновременным уменьшением размеров системы и повышением ее светосилы.

## ДОПУСКИ НА ПАРАМЕТРЫ ПАНКРАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Расчет всякой оптической системы заканчивается вычислением допустимых отклонений конструктивных элементов (радиусов кривизны, толщин линз, воздушных промежутков) от расчетных; допустимых децентрировок; отклонений значений показателей преломления; дисперсий и т. д.

Допустимые отклонения должны быть такими, чтобы условия, которым должна удовлетворять данная оптическая система, не были нарушены. Среди этих условий наиболее важными являются: 1) габаритные размеры, например длина системы в целом или отдельных ее узлов, положение плоскости изображения, фокусное расстояние системы и др.; 2) качество изображения, которое должно оставаться в пределах, определяемых назначением системы и указываемых в технических условиях. Кроме того, в зависимости от назначения оптической системы могут появиться дополнительные условия самого разнообразного характера, которые не всегда могут быть заранее предусмотрены.

Существуют два пути для определения влияния анализируемого параметра на свойства системы. Первый путь — использование зависимостей, связывающих смещение плоскости изображения и параметры системы. Второй путь — расчет хода лучей через оптическую систему, параметры которой последовательно один за другим изменяются на некоторую достаточно малую величину.

При анализе влияния отклонений параметров панкратической системы на величину дополнительного смещения ПИ, вызываемого этими отклонениями, воспользуемся первым (аналитическим) методом. При этом остановимся только на специфических вопросах, связанных с расчетом панкратических систем с линейной связью между перемещениями компонентов. Вопрос о назначении допусков, обеспечивающих сохранение качества изображения, здесь практически не рассматривается. При таких расчетах можно использовать методикку, применяемую для оптических систем с постоянным фокусным расстоянием и относительно подробно изложенную в литературе [32, 40].

# 1. ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПАНКРАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА РАСФОКУСИРОВКУ

## Двухкомпонентная система

Отклонения, вызывающие изменения в смещении плоскости изображения  $\Delta$ , могут возникнуть при изготовлении оптических деталей, из которых состоит оптическая система (отклонения фокусных расстояний от расчетных), осуществлении механических приводов компонентов (отклонения передаточных отношений от расчетных) и, наконец, при сборке и регулировке системы из-за неточной начальной установки компонентов.

Исследуем последовательно влияние на смещение плоскости изображения каждого из перечисленных возможных отклонений. Это исследование можно провести, используя общую зависимость (75), определяющую смещение ПИ в  $n$ -компонентной системе, придавая соответствующим параметрам различные значения (в том числе и меняя одновременно значения всех параметров). Однако эта формула сложна, и аналитическое исследование ее громоздко. Ее удобно применять для многокомпонентных систем ( $n > 4$ ), используя ЭЦВМ.

Для исследования двух-и трехкомпонентных систем воспользуемся более простым (и наиболее распространенным) методом, при котором дифференциал исследуемой функции заменяют ее приращением. В этом случае для малых приращений параметров  $\delta p$ , влияние которых на качество системы исследуется, получаем зависимость дополнительного смещения плоскости изображения  $\delta_p \Delta$  по формуле

$$\delta_p \Delta = \left| \frac{\partial \Delta}{\partial p} \right| \delta p. \quad (117)$$

В табл. 23 приведены выражения  $\delta_{i_2} \Delta$ ,  $\delta_{i_1} \Delta$ ,  $\Delta_1 \delta_{x_0} \Delta$ ,  $\delta_{d_0} \Delta$ ,  $\delta_{f_2} \Delta$  для двухкомпонентной системы.

Для количественной оценки этого влияния и исследования возможностей взаимной компенсации отклонений параметров системы рассмотрим числовой пример.

**Пример.** По формулам (25) для случая  $c^{(2)}_2 = 0$ ;  $c^{(2)}_1 = -1$ ;  $\delta = 60$ ;  $i_2 = 0,1$ ;  $i_1 = -0,5$ ;  $M = 1/12$  получаем следующие параметры СПУ:

$x'_{20} = 0,275$ ;  $f'_2 = 0,25875$ ;  $x_0 = 2,15217$ ;  $d_0 = 0,789132$ ;  $f'_1 = 0,366654$ ;  $d^{(2)}_1 = 27,5$ ;  $d^{(2)}_0 = 22,5$ .

На рис. 53 приведены два варианта СПУ, построенные по найденным параметрам.

На рис. 54 представлены графики изменения отклонений  $\delta_{f_1} \Delta$  и  $\delta_{f_2} \Delta$ , штриховой линией представлен график суммарного влияния отклонений фокусных расстояний обоих компонентов на изменение смещения плоскости изображения. Как следует из графиков рис. 58, при близких между собой значениях фокусных расстояний компонентов (как в рассматриваемом примере) селекцией компонентов с

Таблица 23

$\delta_p \Delta$	$\frac{\partial \Delta}{\partial p} \delta p$	Нули $\frac{\partial \Delta}{\partial p}$	Экстремум $\frac{\partial \Delta}{\partial p}$
$\delta_{i_2} \Delta$	$m \left( 1 - \frac{x'^2}{f_2^2} \right) \delta i_2 \approx m \left[ 1 - \frac{(x'_{20} - i_2 m)^2}{f_2^2} \right] \delta i_2$	$\frac{x'_{20} \pm f_2}{i_2}$	$\frac{2x'_{20} \pm \sqrt{x_{20}'^2 + 3f_2^2}}{3i_2}$
$\delta_{i_1} \Delta$	$m \left[ \frac{x'^2}{f_2^2} - \beta^2 \right] \delta i_1$	0	—
$\delta_{x_0} \Delta$	$[\beta^2 - \beta^2(0)] \delta x_0$		
$\delta_{d_0} \Delta$	$-\frac{(x_2'^2 - x_{20}'^2)}{f_2^2} \delta d_0 \approx \frac{m}{f_2^2} (2x_{20}' i_2 - i_2^2 m) \delta d_0$	$0, 2 \frac{x_{20}}{i_2}$	$\frac{x_{20}'}{i_2}$
$\delta_{f_2} \Delta$	$2(\Delta - i_2 m) \frac{\delta f_2}{f_2} \approx -2i_2 m \frac{\delta f_2}{f_2}$	0	—
$\delta_{f_1} \Delta$	$2 \frac{f_1'^2}{f_2^2} \left[ \frac{x_{20}'^2}{x_0} - \frac{x_2'^2}{(x_0 + jm)} \right] \frac{\delta f_1}{f_1}$		

одинаковым отклонением фокусных расстояний можно исключить или значительно уменьшить влияние этих отклонений на смещение плоскости изображения.

На рис. 55 представлены графики относительных смещений плоскости изображения, возникающих при отклонениях остальных па-

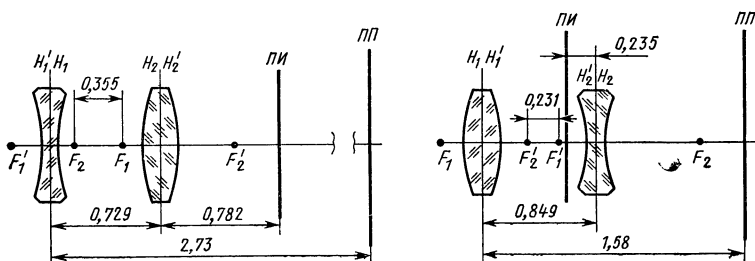


Рис. 53. Варианты оптических систем переменного увеличения

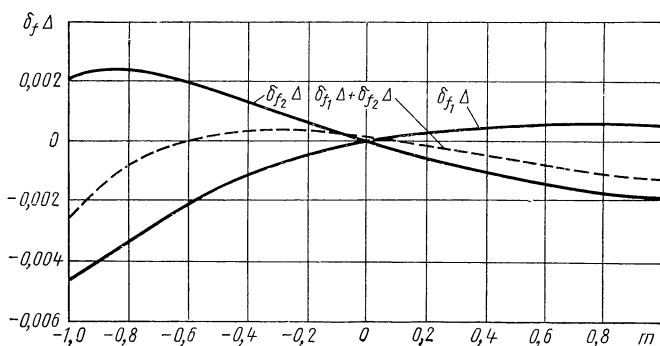


Рис. 54. График изменения величин  $\delta_{f_2} \Delta$ ,  $\delta_{f_1} \Delta$ ,  $\delta_{f_1} \Delta + \delta_{f_2} \Delta$

раметров системы. Исследуя последние графики, нетрудно заметить, что кривые изменения  $\frac{\partial \Delta}{\partial i_1}$  и  $\frac{\partial \Delta}{\partial d_0}$  близки между собой, поэтому влияние ошибки  $\delta i_1$  несложно уменьшить, изменяя расстояние  $d_0$  на величину  $\delta d_0$ . Чтобы не увеличивать смещения изображения в исходной системе переменного увеличения, те параметры, отклонения которых трудно компенсировать, следует выполнять с жесткими допусками.

**Метод компенсации смещения плоскости изображения при малых изменениях параметров панкратической системы.** Выше приведено исследование влияний отклонений параметров системы на

смещение плоскости изображения и исследованы возможности взаимной компенсации отклонений.

На основе рассмотренных числовых примеров покажем возможности использования найденных дополнительных отклонений плоскости изображения для компенсации смещения плоскости изображения в исходной системе. Для уменьшения смещения плоскости изображения можно предложить следующую методику изменения параметров системы.

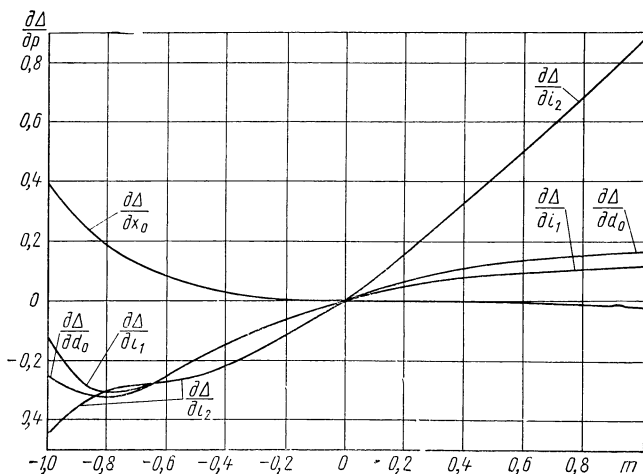


Рис. 55. График изменения величин  $\frac{\partial \Delta}{\partial x_0}$ ,  $\frac{\partial \Delta}{\partial i_1}$ ,  $\frac{\partial \Delta}{\partial i_2}$ ,  $\frac{\partial \Delta}{\partial d_0}$

Сравнивая график изменения смещения плоскости изображения (рис. 55) с графиком изменения относительного отклонения  $\frac{\partial \Delta}{\partial i_1}$ , можно заметить, что при задании определенного значения  $\delta i_1$  суммарное смещение плоскости изображения может быть уменьшено. Так, для рассматриваемого случая, задав величину  $\delta i_1 = 0,1$ , нетрудно найти, что суммарное смещение плоскости изображения на том же диапазоне изменения параметра  $m$  будет примерно в 1,75 раза меньше, чем в исходной системе.

Следовательно, в оптической системе с прежними параметрами при  $i_2 = 0,1$  значение  $i_1$  изменится и будет равно:

$$i'_1 = i_1 + \delta i_1 = -0,5 + 0,1 = -0,4.$$

График смещения плоскости изображения в функции переменного параметра  $m$ , подсчитанного по формуле (24) для новых значений  $i'_1 = -0,4$ ;  $i_2 = 0,1$ , приведен на рис. 56 (кривая 1).

График смещения плоскости изображения, полученный суммированием функции  $\Delta = \Delta(m)$  и  $\frac{\partial \Delta}{\partial i_1} \delta i_1 = \varphi(m)$ , весьма близок к кривой 1.

При вторичной коррекции системы с помощью величины  $\delta x_0$  (для нашего примера  $\delta x_0 = 0,05$ ) изменение смещения плоскости изображения представлено кривой 2 (рис. 56).

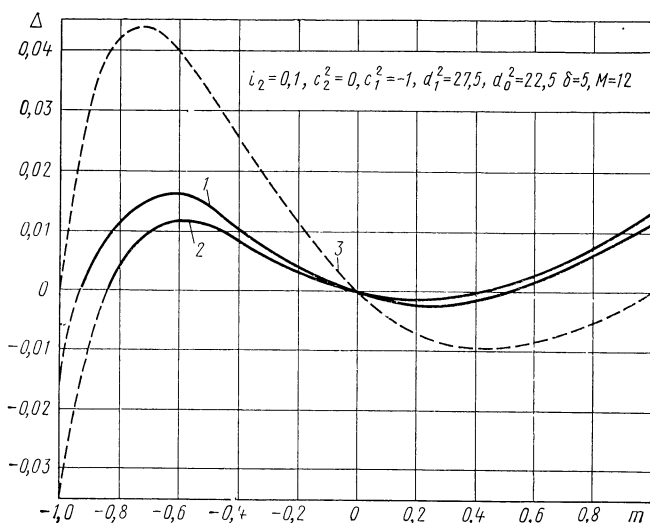


Рис. 56. График коррекции смещения плоскости изображения в двухкомпонентной панкратической системе

Если уменьшить диапазон изменения  $m$ , то система будет иметь сравнительно небольшое смещение плоскости изображения. На рис. 56 штриховой линией приведена кривая изменения смещения плоскости изображений в исходной системе (кривая 3).

Из приведенных графиков видно, что при изменении двух параметров в системе смещение плоскости изображения уменьшается примерно в 4 раза.

Варьируя величины и знаки отклонений параметров, аналогичную коррекцию можно осуществить с помощью изменения других параметров исходной системы.

## Трехкомпонентная система

Смещение плоскости изображения трехкомпонентной СПУ (см. рис. 28) выражается формулой (52), увеличение — формулой (55).

Используя формулу (117), найдем выражения для изменения смещения плоскости изображения при наличии ошибок в передаточных отношениях  $i_0, i_2, i_3, f_1, f_2, f_3, d_{10}, d_{20}, x_0$  (табл. 24).

Т а б л и ц а 24

$\delta_p \Delta$	$\frac{\partial \Delta}{\partial p}$	Нули $\frac{\partial \Delta}{\partial p}$
$\delta_{i_0} \Delta$	$m \beta^2 \delta i_0$	0
$\delta_{i_2} \Delta$	$m \left( \frac{x_3'^2}{f_3^2} - \frac{x_1'^2}{f_1^2} \beta^2 \right) \delta i_2$	
$\delta_{i_3} \Delta$	$m \left( 1 - \frac{x_3'^2}{f_3^2} \right) \delta i_3 \approx m \left[ 1 - \frac{(x_{30}' - i_3 m)^2}{f_3^2} \right] \delta i_3$	$0, \frac{x_{30}' \pm f_2}{i_3}$
$\delta_{d_{10}} \Delta$	$-\frac{1}{f_1^2} [(x_0 - jm)^2 \beta^2 - x_0 \beta^2(0)] \delta d_{10}$	0
$\delta_{d_{20}} \Delta$	$\frac{x_{30}'^2 - x_3'^2}{f_3^2} \delta d_{20} \approx m \frac{2x_{30}' i_3 - i_3^2 m}{f_3^2} \delta d_{20}$	$0, 2 \frac{x_{30}'}{i_3}$
$\delta_{f_1} \Delta$	$2 [x_0 \beta^2(0) - (x_0 - jm) \beta^2] \frac{\delta f_1}{f_1}$	0
$\delta_{f_2} \Delta$	$2 \frac{f_2^2}{f_3^2} \left[ \frac{x_3'^2 (x_0 - jm)}{f_1^2 + (d_{10} - \xi m) (x_0 - jm)} - \frac{x_{30}'^2 x_0}{f_1^2 + d_{10} x_0} \right] \frac{\delta f_2}{f_2}$	0
$\delta_{f_3} \Delta$	$2 (i_3 m - \Delta) \frac{\delta f_3}{f_3} \approx 2 i_3 m \frac{\delta f_3}{f_3}$	
$\delta_{x_0} \Delta$	$[\beta^2 - \beta^2(0)] \delta x_0$	



Формулы, представленные в табл. 24, позволяют определить влияние отклонений параметров системы на смещение плоскости изображения в трехкомпонентных СПУ. Для количественной оценки влияния отклонений и возможностей компенсации отклонений рассмотрим числовой пример.

**Пример.** Определим относительные смещения плоскости изображения при отклонениях параметров от расчетных значений в частном случае трехкомпонентной панкратической системы с неподвижной предметной плоскостью и вторым компонентом, параметры которой были рассчитаны по формулам (54).

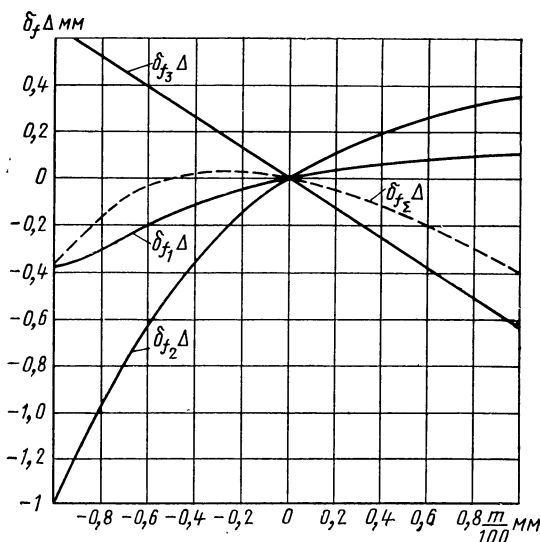


Рис. 57. График изменения величин  $\delta_{f_3} \Delta$ ,  $\delta_{f_2} \Delta$ ,  $\delta_{f_1} \Delta$

Для коэффициентов  $c^{(3)}_3=0$ ;  $c^{(3)}_2=-1$ ;  $c^{(3)}_1=0$ ;  $d^{(3)}_2=10,6066$ ;  $d^{(3)}_1=48,09871$ ;  $d^{(3)}_0=44,3954$ ;  $M=1/10$ ;  $\delta=100$ ;  $i_3=-0,322715$  параметры системы следующие:  $x'_{30}=1,104624$ ;  $f^2_3=2,732594$ ;  $f^2_2=0,640828$ ;  $d_{20}=1,934307$ ;  $x_0=-1,580891$ ;  $d_{10}=-0,989956$ ;  $f^2_1=0,303824$ .

Так как параметры системы рассчитаны для условий неподвижной предметной плоскости и второго компонента, то  $\frac{\partial \Delta}{\partial i_2}=0$  и  $\frac{\partial \Delta}{\partial i_0}=0$ .

Используя найденные данные оптической системы, по формулам табл. 24 проводим расчет относительного смещения плоскости изображения в функции переменного параметра  $m$ .

Результаты расчета представлены в виде графиков (см. рис. 62).

На рис. 57 приведены графики изменения отклонений  $\delta\Delta$ ,  $\delta_{f_1}\Delta$ ,  $\delta_{f_2}\Delta$  и  $\delta_{f_3}\Delta$  при  $\frac{\delta f_1}{f_1} = -0,02$ ;  $\frac{\delta f_2}{f_2} = \frac{\delta f_3}{f_3} = 0,01$ . Как следует из приведенных графиков, суммарное влияние этих отклонений на смещение плоскости изображения значительно уменьшится (штриховая кривая).

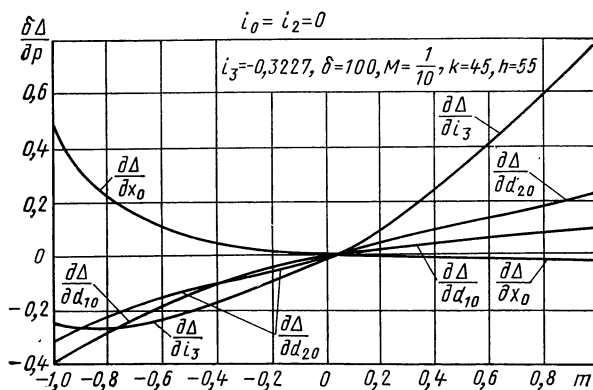


Рис. 58. График изменения величин  $\frac{\partial \Delta}{\partial i_3}$ ,  $\frac{\partial \Delta}{\partial x_0}$ ,  $\frac{\partial \Delta}{\partial d_{20}}$ ,  $\frac{\partial \Delta}{\partial d_{10}}$

На рис. 58 представлены графики относительного смещения плоскости изображения, возникающего при отклонениях остальных параметров системы. Как следует из приведенных графиков, кривые  $\frac{\partial \Delta}{\partial d_{10}}$  и  $\frac{\partial \Delta}{\partial d_{20}}$  близки между собой, и влияние изменения одного из них можно уменьшить соответствующим изменением другого.

Влияние ошибки в передаточном отношении  $i_3$  в значительной степени можно компенсировать изменением величины  $x_0$ .

В трехкомпонентной системе переменного увеличения, так же как и в двухкомпонентной, смещение плоскости изображения можно уменьшить методом изменения параметров системы, который описан выше.

Результаты приведенных исследований могут быть использованы также и для анализа систем постоянного увеличения. Для таких оптических систем в найденных формулах следует положить  $m=0$ .

Описанный метод определения влияния отклонений параметров системы и закона перемещения компонентов в двух- и трехкомпонентных панкратических системах с линейной зависимостью между перемещениями компонентов позволяет при разработке и проектировании подобных систем рационально назначить допуски

на отдельные компоненты схемы. В ряде случаев описанный метод применим для коррекции смещения плоскости изображения в стадии сборки оптических систем, а также при использовании в системе оптических компонентов и механических приводов, изготовленных с соответствующими расчетными отклонениями.

## 2. О РАСЧЕТЕ ДОПУСКОВ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАНКРАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Выше было рассмотрено влияние отклонений параметров панкратических систем на смещение плоскости изображения. После того как определено влияние каждого параметра на смещение плоскости изображения рассматриваемой панкратической системы, нетрудно определить максимально допустимое отклонение величины каждого параметра от расчетного значения.

Максимальное значение допустимого отклонения  $\delta p_i$  данного параметра  $p_i$  оптической системы, вычисленное в предположении, что все остальные параметры имеют отклонения, равные нулю, называется условным допуском [40]. Условные допуски на параметры системы вычисляются по формулам табл. 23 и 24.

Однако от условного допуска нужно перейти к реальному, т. е. максимально допустимой величине изменения параметра  $p_i$  в том случае, когда все остальные параметры также имеют отклонения, не выходящие за границы рассчитанных для них допусков.

Простое деление допустимого отклонения каждого параметра на общее число изменяющихся параметров дает допуск, гарантирующий, что в наихудшем случае, когда значения каждого параметра отличаются от расчетного на максимальную возможную величину и изменения действуют в одну сторону на смещение плоскости изображения, технические условия не будут нарушены. Однако при таком делении допустимые отклонения практически становятся настолько малыми, что их технологическая реализуемость крайне затруднена (или даже неосуществима в настоящее время или в условиях данного производства). С другой стороны, очевидно, что случай сложения абсолютных значений всех отклонений мало вероятен. Поэтому при назначении допусков целесообразно опираться на теорию вероятностей и учитывать технологию изготовления рассматриваемой системы.

При изготовлении оптической детали неизбежно происходит отклонение ее параметров от расчетных значений. Выбор допустимых отклонений зависит от вида функции распределения отклонений и их числа. Поскольку никаких сведений по этому вопросу в литературе нет, естественно положить, что это распределение имеет такой же характер, какой принят в теории погрешностей Гаусса. Если принять это предположение, то для определения допусков можно применить теорию вероятностей, в том числе и метод наименьших квадратов.

Если предположить, что при изготовлении оптических систем действует тот же закон распределения в отклонениях  $\delta p_i$ , какой справедлив для погрешностей наблюдаемых величин, то вклад каждого параметра в величину изменения исследуемых характеристик оптической системы будет обратно пропорционален корню квадратному из числа параметров  $K$  согласно формуле

$$\delta p_i = \frac{\delta p_{im}}{\sqrt{K}},$$

где  $p_{im}$  — среднее арифметическое значение данной величины  $p_i$ .

На практике следует принимать во внимание ряд дополнительных соображений. Прежде всего, назначая те или другие допуски, необходимо считаться с трудностями, возникающими при их выполнении на практике. Например, воздушные промежутки, как правило, можно выдержать с очень большой точностью, что приводит к ослаблению допусков, так как число  $K$  параметров сокращается, и допуски увеличиваются.

При определении допусков изложенным методом не учитывается экономический фактор. Его можно учесть следующим образом. Ряд конструктивных элементов (радиусы кривизны сферических поверхностей, воздушные промежутки и др.) могут быть осуществлены при изготовлении с очень большей точностью без особого труда. Очевидно, при определении окончательных допусков можно задать их для указанных параметров значительно более жесткими и создаваемый таким путем резерв точности использовать для оставшихся параметров, расширив на них допуски.

Нами рассмотрен вопрос о влиянии отклонений параметров панкратической системы (фокусных расстояний, положения компонентов, их перемещения) на дополнительное смещение плоскости изображения, вызываемое этими отклонениями. Суммарное смещение ПИ, обусловленное дополнительным смещением  $\delta\Delta$  и величиной  $\Delta(m)$ , вызовет изменения качества изображения, даваемого данной системой. Суммарное допустимое ухудшение качества изображения системы задается исходя из ее назначения (проекционная, фотообъектив и т. д.) и должно быть рациональным образом использовано конструктором при назначении величины  $\Delta_{\max}$  и отклонений параметров, вызывающих дополнительное смещение ПИ  $\delta\Delta$ . При этом надо учитывать, что на качество изображения системы влияют и отклонения не рассматривавшихся выше факторов (децентрировкой компонентов, отклонением значений показателей преломления и дисперсий, требованиями к однородности и т. д.).

Вопросы влияния децентрировки компонентов оптических систем на качество даваемого системой изображения рассмотрены в ряде работ, которые можно использовать при решении вопроса о назначении допусков на децентрировку [40].

Известны и методы анализа влияния изменения параметров системы на ее аберрационные характеристики [6, 40]. Такой анализ довольно сложен и проводится обычно с использованием ЭЦВМ. Естественно, следует не забывать, что влияние изменения качества изображения системы должно исследоваться с учетом всех факторов (в том числе и механических), приводящих как к смещению плоскости изображения, так и к изменению только аберраций системы.

Связывая качество изображения системы (и положение плоскости наилучшей установки) со смещением плоскости изображения  $\Delta$ , обусловленным линейной связью между перемещениями компонентов, рационально бывает рассмотреть вопрос о выборе закона смещения ПИ  $\Delta = \Delta(m)$ , который бы по возможности совпадал с законом перемещения плоскости наилучшей установки системы при различных увеличениях.

1. Бабушкин С. Г., Крынин Л. И. Объективы переменного фокусного расстояния в любительской киноаппаратуре. — «Оптико-механическая промышленность», 1972, № 5, с. 45—50.
2. Бегунов Б. Н., Заказнов Н. П. Теория оптических систем. М., «Машиностроение», 1973. 488 с.
3. Бегунов Б. Н. Современное состояние панкратических систем. — В кн.: Оптические и оптико-электронные приборы (Сб. трудов МВТУ № 110). М., Оборонгиз, 1962, с. 40—59.
4. Бегунов Б. Н., Савоскин В. И. К вопросу о классификации панкратических объективов. — В кн.: Расчеты оптических систем (Сб. трудов МВТУ № 129). М., 1968, с. 12—14.
5. Волосов Д. С. Методы расчета фотографических систем с переменными оптическими характеристиками. — «Труды ГОИ». 1941, т. XIV, с. 209—228.
6. Волосов Д. С. Методы расчета сложных фотографических систем. М.—Л., Гостехиздат, 1948, 394 с.
7. Волосов Д. С. Фотографическая оптика. М., «Искусство», 1971. 670 с.
8. Градобоева Н. А. Панкратические объективы для фотоаппаратов. — «Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии», 1967, т. 12, № 2, с. 151—153.
9. Дмитриев А. П. Трехкомпонентные системы переменного увеличения с линейной зависимостью между перемещениями компонентов. — «Оптико-механическая промышленность», 1963, № 7, с. 30—33.
10. Иванова Т. А. Исследование трехкомпонентных панкратических систем симметричного типа с линейным перемещением компонентов. — «Известия вузов. Приборостроение», 1971, т. XIV, № 1, с. 99—103.
11. Коротков В. П., Тайц Б. А. Основы метрологии и точности механизмов приборов. М., Машгиз, 1961. 400 с.
12. Лазарев Л. П. Современное состояние и перспективы развития оптических приборов, моделирующих перемещение быстро движущихся объектов. — В кн.: Оптическое приборостроение (Сб. трудов МВТУ № 103). М., Оборонгиз, 1961, с. 5—17.
13. Лебедев Е. Н. Оптический имитатор дальности. — В кн.: Оптическое приборостроение (Сб. трудов МВТУ № 103). М., Оборонгиз, 1961, с. 41—47.

14. Новик Ф. С., Ногин П. А. Киносъемочная оптика. М., «Искусство», 1968. 408 с.
15. Объективы с переменным фокусным расстоянием типа «Гранит». — «Оптико-механическая промышленность», 1970, № 8, с. 19—25.
16. Пахомов И. И. Двухкомпонентные системы переменного увеличения с линейной зависимостью между перемещениями компонентов. — В кн.: Оптическое приборостроение (Сб. трудов МВТУ, № 103). М., Оборонгиз, 1961, с. 63—102.
17. Пахомов И. И. Трехкомпонентные системы переменного увеличения с линейной зависимостью между перемещениями компонентов. — В кн.: Оптические и оптико-электронные приборы (Сб. трудов МВТУ № 110). М., Оборонгиз, 1962, с. 68—99.
18. Пахомов И. И.  $n$ -компонентные системы переменного увеличения с линейной зависимостью между перемещениями компонентов. — «Оптико-механическая промышленность», 1966, № 7, с. 27—32.
19. Пахомов И. И., Перов В. А. Влияние отклонений в параметрах оптических систем. — «Известия вузов. Приборостроение», 1966, т. IX, № 4, с. 101—104.
20. Пахомов И. И. Зеркальные и зеркально-линзовые двухкомпонентные системы переменного увеличения. — «Оптико-механическая промышленность», 1967, № 2, с. 28—31.
21. Пахомов И. И. К расчету зеркальных и зеркально-линзовых систем переменного увеличения с линейной зависимостью между перемещениями компонентов. — «Известия вузов. Приборостроение», 1967, т. X, № 3, с. 92—95.
22. Пахомов И. И. О применении дробей Чебышева к расчету панкратических систем. — В кн.: Расчеты оптических систем (Сб. трудов МВТУ № 129). М., 1968, с. 14—23.
23. Пахомов И. И. Расчет параметров двухкомпонентных панкратических систем с заданным законом перемещения компонентов. — В кн.: Расчеты оптических систем и фотокиноаппаратуры (Сб. трудов МВТУ № 135). М., 1970, с. 19—23.
24. Пахомов И. И., Шикуть А. В. К расчету панкратической оптической системы, работающей с квантовым генератором. — В кн.: Расчеты оптических систем (Сб. трудов МВТУ № 143). М., 1971, с. 62—70.
25. Пахомов И. И., Шикуть А. В. Трехкомпонентные панкратические оптические системы с заданным законом перемещения компонентов. — В кн.: Расчеты оптических систем и фотоаппаратуры (Сб. трудов МВТУ № 143). М., 1971, с. 80—87.
26. Пахомов И. И., Шикуть А. В. К расчету зеркальных и зеркально-линзовых панкратических объективов. — «Известия вузов. Приборостроение», 1971, т. XIV, № 7, с. 114—117.
27. Пахомов И. И., Шикуть А. В. Трехкомпонентные системы переменного увеличения с линейной связью между перемещениями компонентов. — «Оптико-механическая промышленность», 1973, № 4, с. 23—29.
28. Пахомов И. И., Шикуть А. В. Анализ результатов расчета двухкомпонентных панкратических систем с линейной связью между перемещениями компонентов. — «Известия вузов. Приборостроение», т. XVI, 1973, № 8, с. 94—97.
29. Пахомов И. И., Шикуть А. В. О некоторых свойствах панкратических систем. — «Известия вузов. Приборостроение», т. XVI, 1973, № 10, с. 98—101.

30. Пахомов И. И., Шикуть А. В. Расчет панкратических систем с большим перепадом увеличений. — В кн.: Оптико-электронные приборы (Сб. трудов МВТУ № 174). М., 1973, с. 123—127.

31. Пахомов И. И., Шикуть А. В., Хорохоров А. М. Системы переменного увеличения с нелинейной связью между перемещениями компонентов. — В кн.: Оптико-электронные приборы (Сб. трудов МВТУ № 174). М., 1973, с. 123—127.

32. Погарев Г. В. Юстировки оптических приборов, Л., «Машиностроение», 1968, 290 с.

33. Полтырева Е. С. Автоматический способ определения гауссовых элементов панкратических оборачивающих систем с линейным законом перемещения компонентов. — В кн.: Современные методы расчета и проектирования оптических систем. Т. XXXVII, вып. 167. Л., Машиностроение, 1970, с. 28—39.

34. Полтырева Е. С., Полякова М. П., Серегина М. Д. Об автоматическом расчете панкратических систем в области аберраций III порядка. Т. XXXVII, вып. 167, Л., Машиностроение, 1970, с. 39—43.

35. Поспехов В. Г. Выбор параметров двухкомпонентных панкратических систем. — В кн.: Расчеты оптических систем (Сб. трудов МВТУ № 129). М., 1968, с. 27—33.

36. Поспехов В. Г. Трехкомпонентный вариообъектив для ИК области спектра. — «Оптико-механическая промышленность», № 11, 1967, с. 86—88.

37. Поспехов В. Г. Принципы построения вариообъективов с механической компенсацией. — «Оптико-механическая промышленность», 1967, № 1, с. 54—59.

38. Поспехов В. Г. Вариообъективы с оптической компенсацией. — В кн.: Расчеты оптических систем (Сб. трудов МВТУ № 123). М., 1967, с. 35—47.

39. Савоскин В. И. Коэффициенты монохроматических aberrаций 3-го порядка панкратических объективов. — В кн.: Расчеты оптических систем (Сб. трудов МВТУ № 123). М., 1967, с. 58—64.

40. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. Л., «Машиностроение», 1969. 670 с.

41. Стефанский М. С., Сокольский Н. М. Расчет объектива переменного фокусного расстояния с постоянным угловым полем зрения. — «Оптико-механическая промышленность», 1974, № 7, с. 31—34.

42. Стефанский М. С. Определение оптических параметров пятикомпонентных телескопических СПУ при простейшей кинематической схеме. — «Оптико-механическая промышленность», 1962, № 11, с. 18—24.

43. Чебышев П. А. Полное собрание сочинений, т. II. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1947. 925 с.

44. Шикуть А. В., Пахомов И. И. Телескопические панкратические системы для оптических квантовых генераторов. — В кн.: Оптико-электронные квантовые приборы. (Сб. трудов МВТУ № 184). М., 1974, с. 199—207.

45. Шпякин М. Г. Расчет в параксиальной области панкратических объективов большой кратности с линейно перемещающимися компонентами. — «Оптико-механическая промышленность», 1969, № 8, с. 22—25.

46. Шпякин М. Г. Фокусировка панкратических объективов на малые дистанции. — «Оптико-механическая промышленность», 1972, № 1, с. 63—64.

47. **Шпякин М. Г.** Объективы с широким интервалом изменения фокусных расстояний. — «Оптико-механическая промышленность», 1967, № 4, с. 54—66.
48. **Шпякин М. Г.** Расчет панкратического объектива — анастигмата особо большой кратности. — «Оптико-механическая промышленность», 1970, № 1, с. 25—28.
49. **Back F., Lowen H.** Generalized Theory of Zoomar Systems, JOSA, 1958, v. 48, N 3, p. 149—153.
50. **Back F., Lowen H.** The Basic Theory of Varifocal Compensation, JOSA, 1954, v. 44, N 9, p. 684.
51. **Bergstein L.** General Theory of Optically Compensated Varifocal Systems, JOSA, 1958, v. 48, N 3, p. 154.
52. **Bergstein L., Motz L.** Two-Component Optically Compensated Varifocal System, JOSA, 1962, v. 52, N 4, p. 365.
53. **Bergstein L., Motz L.** Three-Component Optically Compensated Varifocal System, JOSA, 1962, v. 52, N 4, p. 356.
54. **Bergstein L., Motz L.** Four-Component Optically Compensated Varifocal System, JOSA, 1962, v. 52, N 4, p. 367.
55. **Bergstein L., Motz L.** Third-Order Aberration Theory for Varifocal Systems, JOSA, 1957, v. 47, N 7, p. 579—583.
56. **Jemieson T.** Thin-Lens Theory of Zoom Systems, Optica Acta, 1970, N 8, p. 565—584.
57. **Kingslake R.** A Classification of Photographic Lens Types, JOSA, 1946, v. 36, N 5, p. 251—255.
58. **Reiss M.** Note on Thin-Lens Color Correction for Variable Focal—Length Lenses, JOSA, 1958, v. 48, N 8, p. 578—579.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

ГЛАВА 1. Определение гауссовых параметров панкратических систем . . . . .	5
1. О классификации систем переменного увеличения . . . . .	6
2. Однокомпонентные системы . . . . .	9
3. Двухкомпонентные системы . . . . .	16
4. Трехкомпонентные системы . . . . .	54
5. $n$ -компонентные системы . . . . .	78
ГЛАВА 2. Автоматическое определение параметров панкратических систем . . . . .	93
1. Применение ЭЦВМ для расчета панкратических систем . . . . .	93
2. Анализ результатов расчета параметров панкратических систем на ЭЦВМ . . . . .	98
3. Об абберационной коррекции панкратических систем . . . . .	115
ГЛАВА 3. Конструирование панкратических систем различного назначения . . . . .	125
1. Телескопические системы . . . . .	125
2. Панкратические объективы . . . . .	131
3. Панкратические системы оптических имитаторов тренажеров . . . . .	139
ГЛАВА 4. Допуски на параметры панкратических систем . . . . .	145
1. Влияние отклонений параметров панкратических систем на расфокусировку . . . . .	146
2. О расчете допусков оптических элементов панкратических систем . . . . .	154
Список литературы . . . . .	156

Иван Иванович Па х о м о в

### ПАНКРАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Редактор издательства *Т. В. Абизова*  
Технические редакторы *Л. Т. Зубко* и *Е. П. Смирнова*  
Корректор *И. М. Борейша*  
Обложка художника *В. Б. Торгашова*

Сдано в набор 14/І 1976 г. Подписано к печати 14/ІV 1976 г. Т-06739.  
Формат 84×108<sup>1/32</sup>. Бумага типографская № 1. Усл. печ л. 8,4. Уч.-изд. л. 10,25.  
Тираж 3400 экз. Заказ № 1575. Цена 54 коп.

Издательство «Машиностроение»,  
107885, ГСП, Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., 3.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете Совета Министров СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

54 коп.



МАШИНОСТРОЕНИЕ