УДК 535.317+681.7.01

Современные методы расчета вариообъективов

© Д.Е. Пискунов[1], А.М. Хорохоров[2], А.Ф. Ширанков[2]

[1] ООО «Исследовательский центр Самсунг», Москва, 127018, Россия
[2] МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Приведен обзор методов расчета вариообъективов. Рассмотрены методы габаритного синтеза вариообъективов с произвольным числом подвижных компонентов и аберрационного синтеза в области аберраций третьего и пятого порядков. Предложен метод расчета вариообъективов, содержащих компоненты с изменяемой оптической силой.

***Ключевые слова**: вариообъектив, габаритный синтез, аберрационный синтез, синтез оптических систем, аберрации, аберрации пятого порядка, жидкие линзы.*

В настоящее время вариообъективы — оптические системы плавного изменения фокусного расстояния — широко применяются в различных областях науки и техники. Развитие методов расчета вариообъективов отражено в многочисленных публикациях как в отечественной, так и в зарубежной литературе.

В общем случае процесс расчета оптической системы вариообъектива можно представить состоящим из следующих этапов:

- выбор структурной схемы вариообъектива — определение числа и относительного расположения компонентов;
- габаритный синтез вариообъектива — определение оптических сил, относительных отверстий и законов перемещения компонентов при заданном перепаде фокусных расстояний, диафрагменном числе, габаритах системы и других конструктивных ограничениях;
- аберрационный синтез вариообъектива — определение конструктивных параметров компонентов вариообъектива, обеспечивающих заданное качество изображения;
- параметрическая оптимизация оптической системы вариообъектива.

Последний этап является наиболее проработанным. В настоящее время в распоряжении разработчиков имеются успешно применяемые системы автоматизированного проектирования, предназначенные для анализа и оптимизации оптических систем.

Габаритный синтез является определяющим этапом проектирования вариообъектива, поскольку именно от качества габаритного синтеза зависят компактность объектива, сложность его конструкции и трудоемкость последующего аберрационного синтеза компонентов.

Рассмотрим развитие методов габаритного расчета вариообъективов. В работе [1] получены выражения для расчета трехкомпонентного вариообъектива с первым и вторым жестко связанными подвижными компонентами. В работе [2] показано, что n попеременно неподвижных и фиксированных относительно друг друга подвижных компонентов могут образовывать систему, в которой при перемещении подвижных компонентов плоскость изображения проходит n раз через одну и ту же позицию в пространстве, т. е. отклонение плоскости изображения от номинального положения будет нулевым для n положений объектива и не превысит заранее определенного значения для промежуточных положений. На основе аппарата матричной оптики в работе [3] представлен метод для расчета трех- и пятикомпонентных систем переменного увеличения (СПУ) с жестко связанными подвижными компонентами. Теория расчета систем с линейной связью между перемещениями компонентов предложена в работе [4]. Согласно этой теории, для расчета вариообъектива обратное увеличение и смещение плоскости изображения, умноженное на обратное увеличение, представляют в виде полиномов n и $n + 1$ степени соответственно (n — число компонентов), а частное полученных полиномов раскладывают в непрерывную дробь. Далее определяют коэффициенты разложения, которые связаны с параметрами СПУ. Общим недостатком указанных выше работ является то, что в рассчитанных системах при изменении фокусного расстояния происходит смещение плоскости изображения.

Вопросам расчета систем с механической компенсацией посвящен ряд публикаций [5–10]. В работах [5–7] приведен анализ четырех- и пятикомпонентных панкратических систем. Предложена классификация вариообъективов, получены законы перемещения компонентов, найдены особые точки в законах перемещения компонентов. Отметим, что в указанных работах не уделяется внимание определению фокусных расстояний компонентов системы. Для устранения этого недостатка в работе [8] предложен способ определения фокусных расстояний четырехкомпонентной системы с двумя подвижными компонентами. В работе [9] найдено дифференциальное уравнение, связывающее изменение увеличения отдельных компонентов СПУ при их бесконечно малом перемещении со смещением плоскости изображения. В работах [9, 10] данное уравнение используется для расчета двух- и трехкомпонентных систем.

Среди отечественных авторов первые исследования в области теории расчета фотографических объективов с переменным фокусным расстоянием были выполнены Д.С. Волосовым. Дальнейшее развитие теория и практика проектирования оптических систем с переменными характеристиками получили в работах [11–13]. В работе [11] проведен анализ и предложена методика расчета пятикомпонентной телескопической системы переменного углового увеличения, в которой первый, третий и пятый компоненты неподвижны, а второй и четвертый жестко связаны. Для расчета многокомпонентных телескопических СПУ в работе [12] предложен прием, названный методом сложения. Метод предполагает разбиение многокомпонентной системы на две составляющие, что позволяет упростить задачу расчета системы, поскольку отпадает необходимость совместного решения большого числа уравнений высоких степеней. Рассматриваемые телескопические системы могут применяться в качестве насадок к объективам с фиксированным фокусным расстоянием. В работе [13] рассмотрены вопросы выбора оптимальной структуры вариообъектива, обладающей максимумом коррекционных возможностей и минимальными габаритами. Предложена формула, позволяющая оценить исходную схему объектива по одному параметру *C*. Данный параметр зависит от максимального фокусного расстояния системы, относительного отверстия, кратности изменения фокусных расстояний и общей длины системы. Параметр *C* характеризует потенциальное качество рассчитываемого объектива: чем больше *C*, тем оптимальнее схема объектива и тем более высокие его характеристики могут быть получены при одинаковой длине системы.

Общим недостатком приведенных работ является то, что в них рассматриваются лишь частные структурные схемы построения вариообъективов. Впервые общая теория расчета двух-, трех- и *n*-компонентных систем с оптической и механической компенсацией смещения изображения была развита в работах И.И. Пахомова [14–16]. В работе [14] предложена методика расчета СПУ с линейной связью между перемещениями компонентов и на ее основе — методика расчета панкратических систем с механической компенсацией [15, 16], развита теория обобщенных параметров панкратических систем, позволяющая при заданном перепаде увеличения определить гауссовы параметры систем, заведомо обеспечивающие этот перепад.

В работах [17, 18] на основе теории обобщенных параметров панкратических систем И.И. Пахомова предложена методика автоматизированного выбора оптимальной структуры и габаритного синтеза вариообъективов с двумя подвижными компонентами. Методика предусматривает последовательное выполнение трех этапов: приведение исходной системы вариообъектива к эквивалентной одно-, двух- или трехкомпонентной панкратической системе, определение гауссовых параметров эквивалентной системы, обратный переход от эквивалентной системы к исходной. Множество полученных таким образом систем анализируется затем с помощью целевой функции, которая по специально разработанному критерию оценивает их качество. Методика позволяет с помощью обобщенных параметров проанализировать все многообразие систем с двумя подвижными компонентами.

Для того чтобы получить большой перепад фокусных расстояний и при этом удовлетворить данным в техническом задании габаритам системы, а также обеспечить приемлемые относительные отверстия, необходимо использовать системы с числом подвижных компонентов более двух. В работах [19–21] разработан метод расчета вариообъективов с произвольным числом подвижных и неподвижных компонентов. Метод предусматривает определение законов перемещения компонентов в виде разложения по базисным функциям. Расчет объектива в этом случае сводится к определению коэффициентов разложения.

Задача расчета вариообъектива с произвольным числом подвижных и неподвижных компонентов может быть сведена к решению следующей системы нелинейных уравнений:

$$\mathbf{P}(\mathbf{d}, \boldsymbol{\varphi}) = \mathbf{P}_k, \tag{1}$$

где $\mathbf{P}$ — вектор параксиальных величин, которые должны быть равны предписанным значениям; $\mathbf{d}$ — вектор расстояний между компонентами; $\boldsymbol{\varphi}$ — вектор оптических сил компонентов; $\mathbf{P}_k$ — вектор предписанных значений (или целей в терминах автоматизированного проектирования) параксиальных величин для k-й позиции, $k = 1, \ldots, K$, K — число позиций.

В большинстве работ при аналитическом решении системы уравнений (1) полагают, что вектор $\boldsymbol{\varphi}$ известен, т. е задача сводится к определению законов перемещения компонентов

$$\mathbf{P}(\mathbf{d}) = \mathbf{P}_k, \quad \mathbf{d} = ? \tag{2}$$

Но даже в таком упрощенном виде аналитическое решение системы (2) найдено только для частных случаев: для систем с двумя и тремя перемещающимися группами. Один из подходов для решения системы (2) — это ее преобразование к степенному уравнению. В работе [19] показано, что для определения законов перемещения подвижных компонентов двух- и трехкомпонентной систем необходимо решить уравнение второй и шестой степени соответственно. Решение последнего уравнения вызывает определенные проблемы.

В случае решения системы (2) численными методами возникает проблема согласования корней: отдельные решения не могут быть соединены одной плавной кривой, т. е. не обеспечивается плавность перемещения компонентов.

В работе [22] для решения данной проблемы предлагается выбирать вектор изменения параксиальных величин для двух соседних позиций бесконечно малым: $\|\mathbf{P}_{k+1}-\mathbf{P}_k\| \to 0$ и затем для определения $\mathbf{d}$ минимизировать функцию:

$$\mathbf{\Phi}(\mathbf{d}) = \left[\mathbf{P}(\mathbf{d}) - \mathbf{P}_k\right]^{\mathrm{T}} \left[\mathbf{P}(d) - \mathbf{P}_k\right]. \tag{3}$$

На практике же величина $\|\mathbf{P}_{k+1}-\mathbf{P}_k\|$ имеет конечное значение, и при неправильном ее выборе возможна ситуация, когда решения будут лежать на разных кривых. Такой подход приводит к большим вычислительным затратам, поскольку число позиций $K \to \infty$ при $\|\mathbf{P}_{k+1}-\mathbf{P}_k\| \to 0.$ Существенным недостатком метода является то, что он не позволяет проводить оптимизацию по $\boldsymbol{\varphi}$, так как каждое решение $\mathbf{d}$, найденное с помощью минимизации (3), зависит от предыдущего. Кроме того, увеличение числа позиций K приводит к увеличению числа неизвестных $\mathbf{d}$, поскольку $\mathbf{d}$ зависит от номера k позиции. Предложенный в работах [19–21] метод свободен от указанных недостатков. Рассмотрим этот метод.

Каждое расстояние d вектора $\mathbf{d}$ есть функция от фокусного расстояния системы: $d = d(f')$, либо в параметрическом виде $d = d(m)$, $f' = f'(m)$, где m — параметр, определяющий положение компонентов. Представим данные функции в виде разложения по базисным функциям

$$d(x) = \sum_{i=0}^{N} a_i F_i(x), \tag{4}$$

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

Подставив разложение (4) в систему (1), получим

$$\mathbf{P}(\mathbf{a}, \boldsymbol{\varphi}) = \mathbf{P}(\mathbf{x}). \tag{5}$$

В результате вместо вектора расстояний $\mathbf{d}$ необходимо определить коэффициенты $\mathbf{a}$ разложения по базисным функциям. При решении системы (5) численными методами не возникает проблемы согласования корней, так как они заведомо принадлежат одной кривой, увеличение числа K позиций не приводит к увеличению числа неизвестных, кроме того, появляется возможность минимизировать оптические силы $\boldsymbol{\varphi}$.

Для расчета системы с произвольным числом подвижных и неподвижных компонентов необходимо: выбрать исходную систему, представить законы изменений расстояний между компонентами в виде разложения по базисным функциям, составить систему уравнений, определить оптические силы $\boldsymbol{\varphi}$ компонентов и коэффициенты $\mathbf{a}$ разложения.

Отметим, что предлагаемый метод пригоден для расчета систем с любым способом компенсации смещения плоскости изображения. Например, если выбрать степенные функции в качестве базисных и ограничиться первым порядком в разложении (4), то получим системы с линейной связью между перемещениями компонентов. Если при определении законов перемещения обеспечить равенство коэффициентов разложения при первом члене, то получим системы с жестко связанными подвижными компонентами. Очевидно, чтобы перейти к системам с механической компенсацией, число членов разложения (4) должно быть более одного.

Рассмотренные выше методы применимы для вариообъективов, в которых изменение фокусного расстояния обеспечивается за счет перемещения компонентов вдоль оптической оси системы. В последнее время появились технологии, которые позволяют изменять оптическую силу линзы, что может быть использовано для разработки более простых, компактных и легких вариообъективов. До коммерческой реализации доведены технологии, в которых для изменения оптической силы жидкой линзы используется эффект электросмачивания [23] или эластичная полимерная мембрана [24]. В работах [25, 26] предложены методы расчета систем с двумя и тремя компонентами с изменяемой оптической силой. Отметим, что предложенный в работах [19–21] метод также может быть применен и для расчета систем, включающих компоненты с изменяемой оптической силой.

Представим закон изменения оптической силы компонента в виде разложения по базисным функциям:

$$\varphi(x) = \sum_{i=0}^{N} b_i F_{\varphi i}(x), \qquad (6)$$

где b_i — коэффициенты разложения; N — число членов разложения; $F_{\varphi i}(x)$ — базисная функция i-го порядка; x — аргумент базисной функции.

Подставив разложение (6) в систему (5), получим

$$\mathbf{P}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \mathbf{P}(\mathbf{x}). \qquad (7)$$

В результате расчет объектива сводится к определению коэффициентов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ разложения. Такой подход позволяет рассчитывать как традиционные системы с подвижными компонентами, так и комбинированные, т. е. содержащие и подвижные компоненты и компоненты с перестраиваемой оптической силой.

Следующим этапом расчета вариообъектива является аберрационный синтез. В настоящее время вопросы теории аберрационного синтеза вариообъективов недостаточно освещены в мировой научно-технической литературе.

В работе [27] получены выражения, связывающие изменение аберраций оптической системы с некоторым параметром, называемым авторами «изгибом» (англ. *bending*) линзы. Изгиб линзы представляет собой небольшое изменение кривизны одной из поверхностей линзы, при котором кривизна второй поверхности принимает такое значение, что оптическая сила линзы не изменяется. Использование этого свойства эффективно при аберрационной коррекции вариообъективов. Изменение аберраций только от изгиба линзы позволяет сохранить определенные на этапе габаритного синтеза законы перемещения и оптические силы компонентов. В работе [27] также показано, что для исправления монохроматических аберраций вариообъектива необходимы, по крайней мере, четыре линзы.

Как утверждается в работе [27], главная проблема при исправлении аберраций вариообъектива заключается в том, что система должна работать в интервале фокусных расстояний, и совершенно очевидно, что невозможно свести аберрации до нуля во всем этом интервале. Лучшее, что можно сделать — свести аберрации до нуля или другого желаемого значения в конечном числе точек (положений компонентов), ожидая, что аберрации в промежуточных точках будут находиться в допустимых пределах. Ясно, что число точек, в которых аберрации будут иметь заданное значение, зависит от числа компонентов в системе. Для упрощения проблемы проектирования и получения большей свободы в работе [27] предлагается исправлять систему для ряда указанных точек, в которых аберрации должны быть одинаковыми. Затем аберрации во всех точках можно сделать как угодно малыми с помощью дополнительной системы с фиксированным фокусным расстоянием, расположенной позади системы переменного увеличения.

В работе [28] описанный подход используется при проектировании систем, состоящих из тонких компонентов.

В работе [29] предложена методика определения коэффициентов аберраций третьего порядка тонких компонентов. Согласно этой методике, аберрационные коэффициенты СПУ для каждого положения компонентов выражают через некоторые вспомогательные параметры, являющиеся, по сути, аналогами основных параметров тонких компонентов. Далее аберрационные коэффициенты приравнивают требуемым значениям. Таким образом, получают систему линейных уравнений, которую решают относительно указанных вспомогательных параметров. Вопрос о том, как определить требуемые значения аберрационных коэффициентов, не рассматривается.

В работе [30] предлагается методика поиска параметров схемы панкратического объектива в тонких компонентах в объединенной области гауссовых параметров и аберраций первого и третьего порядков. Расчет объектива, согласно данной методике, сводится к условной оптимизации в пространстве углов и высот первого вспомогательного луча, а также основных параметров тонких компонентов.

Общим недостатком известных методов расчета является то, что они основаны на теории аберраций третьего порядка, которая эффективна при небольших относительных отверстиях и полях зрения. Задача же расчета большинства светосильных широкопольных объективов решается путем минимизации оценочной функции, в которой учитываются требования к аберрационной коррекции и конструктивные ограничения. Реальные аберрации определяются из расчета хода большого числа лучей. Исходную систему для оптимизации, как правило, заимствуют из патентных и литературных источников, либо выбирают из каталога систем, поставляемого совместно с коммерческим программным обеспечением. Недостатки такого подхода очевидны. Во-первых, локальные методы оптимизации, используемые в большинстве программ оптических расчетов, не гарантируют оптимальности решения (методы глобального поиска также используются, но, как правило, только на начальных этапах расчета вследствие их плохой сходимости применительно к оптическим системам). Во-вторых, поскольку исходная система заимствуется из каких-либо источников, создание новых патентно-чистых систем с помощью данного подхода затруднительно. В-третьих, несмотря на высокий уровень развития вычислительной техники, процесс оптимизации занимает достаточно длительное время, вследствие необходимости расчета большого числа лучей. В работах [19, 31] предложена методика аберрационного синтеза вариообъективов, свободная от указанных недостатков. Методика состоит из следующих этапов: 1) определение основных параметров и хроматических коэффициентов тонких компонентов; 2) синтез компонентов без учета их толщин в области аберраций третьего порядка; 3) переход от бесконечно тонких компонентов к компонентам конечной толщины; 4) аналитико-оптимизационный синтез в области аберраций третьего и пятого порядков.

На первом этапе на основе данных, полученных в результате габаритного синтеза, определяются основные параметры $\overline{P}$ и $\overline{W}$ и хроматические коэффициенты C тонких компонентов. Метод определения параметров основан на теории аберраций третьего порядка.

В работах [19, 31] показано, что для вычисления $\bar{P}$ и $\bar{W}$ необходимо решить систему уравнений

$$\sum_i A_{i,j}\bar{P}_i + \sum_i B_{i,j}\bar{W}_i = F_j, \quad j = 1, ..., N, \tag{8}$$

где i — номер компонента; j — номер положения компонентов; N — число положений; $A_{i,j}$, $B_{i,j}$, F_j — коэффициенты.

В зависимости от соотношения числа компонентов и их положений система уравнений (8) может быть как переопределенной, так и недоопределенной, что обусловливает методы ее решения. Предлагается отыскивать псевдорешение, наилучшим образом удовлетворяющее всем уравнениям системы, т. е. норма невязки (евклидова, Чебышева и др.) для которого минимальна.

Аналогичный подход применен для определения хроматических коэффициентов C_i.

Решение системы (8) в совокупности с решением системы уравнений для хроматических коэффициентов позволяет получить все исходные данные (φ_i, $\bar{P}_i$, $\bar{W}_i$, C_i) для синтеза отдельных тонких компонентов вариообъектива.

Далее следует этап синтеза компонентов в области аберраций третьего порядка. В работе [32] предложен метод синтеза компонента, состоящего из произвольного числа линз. Метод предусматривает приведение компонента к тонкому триплету и расчет его параметров, при этом параметры линз, не входящих в триплет, используются для обеспечения положительных толщин компонентов и минимизации аберраций высших порядков.

Конструктивные элементы оптической системы, состоящей из бесконечно тонких линз, являются лишь первым приближением решения задачи расчета вариообъектива. Для расчета значений конструктивных элементов реальной оптической системы необходимо перейти к линзам конечной толщины. Предлагаемый метод перехода предусматривает сохранение оптических сил компонентов системы и сумм Зейделя. Преимуществом такого метода является неизменность оптических характеристик вариообъектива при переходе от тонких к «толстым» компонентам. Кроме того, появляется возможность ввода толщины для каждого компонента независимо от других. Переход к компонентам конечной толщины сводится к минимизации оценочной функции, в которую входят оптические силы и суммы Зейделя, а также другие члены, например учитывающие требование минимизации кривизны поверхности.

Теория и практика аберрационных расчетов показывают, что реальные аберрации светосильных оптических систем значительно отличаются от аберраций третьего порядка, поэтому для таких систем на этапе синтеза следует учитывать аберрации высших порядков. В работе [33] предложен аналитико-оптимизационный метод аберрационного синтеза оптических систем, позволяющий проводить расчет вариообъективов с учетом аберраций пятого порядка. Метод основан на разложении функции поперечной аберрации по полиномам Чебышева с последующей минимизацией коэффициентов разложения.

Разложение поперечной аберрации $\Delta y'$ по полиномам Чебышева имеет следующий вид:

$$\Delta y' = b_1 T_{1m} + b_2 T_{1M} + b_3 T_{2m} + b_4 T_{2M} + b_5 T_{1m} T_{1M} + b_6 T_{3m} + b_7 T_{3M} +$$

$$+ b_8 T_{1m} T_{2M} + b_9 T_{2m} T_{1M} + b_{10} T_{4m} + b_{11} T_{4M} + b_{12} T_{1m} T_{3M} + b_{13} T_{2m} T_{2M} +$$

$$+ b_{14} T_{3m} T_{1M} + b_{15} T_{5M} + b_{16} T_{1m} T_{4M} + b_{17} T_{3m} T_{2M} + b_{18}, \qquad (9)$$

где $T_{1m}, ..., T_{5m}$, $T_{1M}, ..., T_{5M}$ — наименее отклоняющиеся от нуля полиномы Чебышева для меридионального и сагиттального сечений соответственно; $b_1, ..., b_{18}$ — коэффициенты разложения. В работе [33] получены выражения, связывающие коэффициенты $b_1, ..., b_{18}$ с коэффициентами разложения в степенной ряд.

Важными аргументами в пользу целесообразности использования полиномов Чебышева являются следующие их свойства. Во-первых, из всех полиномов степени n полиномы Чебышева в области [–1, 1] имеют наименьшее отклонение от нуля. Во-вторых, область значений полиномов по модулю не превышает $1/2^{n-1}$. С учетом данных свойств задача расчета объектива на этапе аналитико-оптимизационного синтеза может быть сведена к минимизации абсолютных значений коэффициентов разложения по полиномам Чебышева. При этом автоматически минимизируются аберрации третьего и пятого порядков для всего зрачка. Кроме того, значения коэффициентов разложения позволяют оценить уровень этих аберраций, т. е. контролировать ход процесса при автоматизированном аберрационном синтезе. Для минимизации коэффициентов $b_1, ..., b_{18}$ требуются значительно меньшие вычислительные мощности, чем для минимизации реальных аберраций, полученных из расчета хода лучей, поскольку для вычисления коэффициентов разложения достаточно рассчитать ход всего двух вспомогательных лучей.

Таким образом, приведен обзор методов расчета вариообъективов, рассмотрены методы габаритного синтеза вариообъективов с произвольным числом подвижных компонентов и их аберрационного синтеза в области аберраций третьего и пятого порядков. Предложен метод расчета вариообъективов, включающих компоненты с изменяемой оптической силой.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Back F., Lowen H. The basic theory of variofocal lenses with linear movement and optical compensation. *JOSA*, 1954, vol. 44(9), pp. 684–691.

[2] Bergstein L. General theory of optically compensated varifocal systems. *JOSA*, 1958, vol. 48(3), pp. 154–171.

[3] Wooters G., Silvertooth E.W. Optically compensated zoom lens. *JOSA*, 1965, vol. 55, pp. 347–351.

[4] Pegis R.J. First-order design theory for linearly compensated zoom systems. *JOSA*, 1962, vol. 52, pp. 905–911.

[5] Tanaka K. Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 1: Four-component type. *Applied Optics*, 1982, vol. 21, no. 12, pp. 2174–2183.

[6] Tanaka K. Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 2: Generalization of Yamaji Type V. *Applied Optics*, 1982, vol. 21, no. 22, pp. 4045–4053.

[7] Tanaka K. Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 3: Five-component type. *Applied Optics*, 1983, vol. 22, no. 4, pp. 541–553.

[8] Kryszczynski T. Paraxial determination of the general four-component zoom system with mechanical compensation. *Proc. SPIE*, 1995, vol. 2539, pp. 180–191.

[9] ChunKan T. Design of zoom system by the varifocal differential equation. *Applied Optics*, 1992, vol. 31, no. 13, pp. 2265–2273.

[10] ChunKan T. Varifocal differential equation theory of zoom lens. *Proc. SPIE*, 1995, vol. 2539, pp. 168–179.

[11] Стефанский М.С. Определение оптических параметров пятикомпонентных СПУ при простейшей кинематической схеме. *Оптико-механическая промышленность*, 1962, № 11, с. 18–24.

[12] Стефанский М.С. Параксиальные элементы многокомпонентных телескопических систем переменного увеличения. *Оптико-механическая промышленность*, 1964, № 3, с. 42–46.

[13] Шпякин М.Г. Выбор исходной схемы объектива с переменным фокусным расстоянием и соотношения между его длиной и оптическими параметрами. *Оптико-механическая промышленность*, 1968, № 2, с. 28–32.

[14] Пахомов И.И. *Панкратические системы*. Москва, Машиностроение, 1976, 160 с.

[15] Пахомов И.И. Расчет двухкомпонентных систем переменного увеличения. *Оптико-механическая промышленность*, 1981, № 5, с. 15–19.

[16] Пахомов И.И. Трехкомпонентные панкратические системы с механической компенсацией. *Оптико-механическая промышленность*, 1982, № 6, с. 22–25.

[17] Пахомов И.И., Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф. Автоматизированный габаритный расчет вариообъективов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2010, № 3(80), с. 26–41.

[18] Пахомов И.И., Пискунов Д.Е., Фролов М.Е., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф. Автоматизированный габаритный расчет вариообъективов. *Прикладная оптика. Сб. трудов IX междунар. конф*. Санкт-Петербург, 2010, т. 2, с. 316–320.

[19] Пискунов Д.Е. *Методика синтеза высококачественных вариообъективов с произвольным числом подвижных компонентов*. Дис. … канд. техн. наук. Москва, 2013, 175 с.

[20] Пахомов И.И., Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М. Численный метод расчета систем переменного увеличения с произвольным числом подвижных компонентов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2012, спецвып. № 8, с. 25–35.

[21] Пахомов И.И., Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М. Расчет систем переменного увеличения с произвольным количеством подвижных групп. *Прикладная оптика. Сб. трудов X междунар. конф*. Санкт-Петербург, 2012, т. 1, с. 57–61.
[22] Ivanov A.V. Automatic computation of displacement of zoom lens movable components. *Proc. SPIE*, 1999, vol. 3780, pp. 191–198.
[23] http://www.varioptic.com
[24] http://www.optotune.com
[25] Miks A., Novak J. Analysis of two-element zoom systems based on variable power lenses. *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 7, pp. 6797–6810.
[26] Miks A., Novak J. Analysis of three-element zoom lens based on refractive variable-focus lenses. *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 24, pp. 23989–23996.
[27] Bergstein L., Motz L. Third-Order Aberration Theory for Variofocal Systems. *JOSA*, 1962, vol. 47(7), pp. 579–583.
[28] Jamieson T.H. Thin-lens theory of zoom systems. *Optica Acta*, 1970, vol.17(8), pp. 565–584.
[29] Miks A., Novak J., Novak P. Method of zoom lens design. *Applied Optics*, 2008, vol. 47, no. 32, pp. 6088–6098.
[30] Крутман С.А., Поспехов В.Г. Методика автоматизированного синтеза панкратических объективов в тонких компонентах. *Прикладная оптика. Сб. трудов IX междунар. конф*. Санкт-Петербург, 2010, т. 1, ч. 1, с. 80–84.
[31] Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф. Методика автоматизированного синтеза вариообъективов в области аберраций третьего и пятого порядков. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2012, спецвып. № 8, с. 36–52.
[32] Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М. Метод расчета оптических систем, состоящих из произвольного количества компонентов. *Естественные и технические науки*, 2012, № 4, с. 236–240.
[33] Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М. Аналитико-оптимизационный метод аберрационного синтеза оптических систем. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2012, № 7, URL: http://technomag.edu.ru/doc/442505.html (дата обращения 27.01.2013).

Статья поступила в редакцию 03.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф. Современные методы расчета вариообъективов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9.

URL: http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/927.html

Пискунов Дмитрий Евгеньевич родился в 1985 г. Канд. техн. наук, инженер в ООО «Исследовательский центр Самсунг» (Москва). Имеет 10 научных работ в области расчета оптических систем. e-mail: piskunovde@gmail.com

Хорохоров Алексей Михайлович родился в 1945 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» факультета «Радиоэлектроника и лазерная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 160 научных работ в области современной оптики и оптотехники. e-mail: a.horohorov@yandex.ru

Ширанков Александр Федорович родился в 1950 г. Канд. техн. наук, начальник отдела НИИ «Радиоэлектроники и лазерной техники» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 240 опубликованных работ в области классической и лазерной оптики. e-mail: ashirankov@mail.ru