

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

УДК 535.317; 681.7
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-1-104-111>

Поступило в редакцию 27.06.2018
Received 27.06.2018

Академик А. П. Шкадаревич¹, Н. К. Артюхина², Альмахмуд Шуаиб Хассан³

¹*Научно-технический центр «Лазеры в экологии, медицине и технологии» Белорусского оптико-механического объединения, Минск, Республика Беларусь*

²*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

³*Университет Аль-Баат, Хомс, Сирия*

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НОВОЙ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ПАНКРАТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТИВА

Аннотация. Представлена методика расчета новой структурной модели объектива с переменным фокусным расстоянием. Основная композиция состоит из трех компонентов, два из которых подвижны. Исследованы схемы объективов с механической и оптической компенсацией изображения. Установлено, что композиция с подвижным первым компонентом обеспечивает малые габариты. На основании предложенных формул установлены параметры композиции с подвижным первым компонентом, обеспечивающей малые габариты, и дан расчет конструктивных параметров панкратического объектива из трех компонентов, а также объектива дискретного типа с десятикратным перепадом. Математические модели доказывают, что существуют два и четыре потенциальных решения для сопряженных систем при бесконечном и конечном расположении предмета соответственно; корни уравнений алгоритма получены простыми алгебраическими вычислениями.

Ключевые слова: оплотехника, объектив переменного увеличения, закон движения, коррекция аберраций, сводка основных параметров системы, качество изображения

Для цитирования. Шкадаревич, А. П. Методика расчета новой структурной модели трехкомпонентной системы панкратического объектива / А. П. Шкадаревич, Н. К. Артюхина, Альмахмуд Шуаиб Хассан // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 1. – С. 104–111. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-1-104-111>

Alexey P. Shkadarevich¹, Nina K. Artsiukhina², Almahmoud Shoaeb Hasan³

¹*Scientific and Technical Center “Lasers in Ecology, Medicine and Technology” of the Belarusian Optical-Mechanical Association, Minsk, Republic of Belarus*

²*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*

³*Al-Bath University, Homs, Syria*

METHOD OF CALCULATING A NEW MODEL OF THE TREE-COMPONENTS ZOOM SYSTEM

Abstract. The method of calculating a new structural model of a lens with a variable focal length is presented. The main composition is represented by three components, two of which are movable. The schemes of the lens with mechanical and optical compensation of an image are examined. It was found that the composition with a movable first component provides small sizes. On the basis of the proposed formula the parameters of the composition with a movable first component providing a small size and given the design parameters of a zoom lens of three components and the discrete-type lens with ten-fold magnification. Mathematical models prove that there are two and four potential solutions to the infinite and finite conjugate systems, respectively, and all roots can be obtained by simple algebraic calculations.

Keywords: calculation optics, zoom lens, variable magnification lens, law of motion, aberration correction, system summary graphic, image quality

For citation: Shkadarevich A. P., Artsiukhina N. K., Almahmoud Shoaeb Hasan. Method of calculating a new model of the tree-components zoom system. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 1, pp. 104–111 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-1-104-111>

Введение. В настоящее время широкое распространение получили оптические системы переменного увеличения, позволяющие изменять поле зрения путем перемены относительных положений их компонентов. Современные разработки активно используются в военно-технической сфере, в том числе при проектировании оптики прицелов стрелкового оружия [1]. Такая оптика имеет ряд функциональных преимуществ: возможность применения только одного объектива и получения изображений различного масштаба при наблюдении с одной и той же исходной точки на одном приемнике.

Оптические системы (ОС) с переменным увеличением можно классифицировать как [2; 3]:
вариобъективы – объективы, фокусное расстояние которых непрерывно изменяется за счет перемещения его компонентов вдоль оптической оси;

трансфокаторы – оптические системы, состоящие из двух модулей: афокальной панкратической насадки и объектива с постоянным фокусным расстоянием.

Объективы с переменным увеличением разделяют также по методу компенсации изображения (механический и оптический) [4]. Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки. При оптической компенсации имеем упрощение конструкции, что обеспечивает массогабаритные преимущества; тогда как при механической необходимо вводить нелинейный закон движения хотя бы для одного из компонентов системы для сохранения нулевого смещения плоскости изображения. Объективы с оптической компенсацией целесообразно использовать в качестве дискретного объектива, где нулевое смещение изображения зависит от числа оптических компонентов самого объектива (трех, четырех или более).

Этапы проектирования объективов переменного увеличения выполняют определенные задачи. Структурный анализ (первый этап) устанавливает определенную структуру схемы объектива и ее основные характеристики (значение перепада увеличения или диапазон изменения фокусного расстояния), а также следующие параметры: число компонентов; фокусные расстояния и закон движения компонентов, определяющий расстояния между ними, величина осевого смещения плоскости изображения. На втором этапе определяются конструктивные параметры оптической системы, которые позволяют получить необходимые аберрационные характеристики: число и тип отдельных компонентов (склейка, триплет и т. д.), показатели преломления материалов, радиусы кривизны поверхностей и толщины линз, расстояния между линзами, коэффициенты асферики поверхностей.

Цель работы – развитие расчетно-методической базы оптоотехники для новых структурных моделей панкратических объективов.

Современные методики описывают как алгебраические решения, так и композиционные, основанные на синтезе базовых моделей и коррекционных компонентов. Они устанавливают подход к аберрационному анализу и служат источником новых схемных решений [5].

Основная часть. Формирование структурной модели (синтез ОС) использует основные положения теории композиции, под которой можно понимать широкий подход к созданию той или иной системы, допускающий варианты взаимного перемещения элементов в оптической схеме. На этом этапе проектирования возможны любые методы оптимизации первоначальных значений конструктивных параметров (радиусов оптических поверхностей r , осевых расстояний d , показателей преломления оптических сред n) по заданным оптическим характеристикам (фокусному расстоянию f' , масштабу изображения β , суммам Зейделя и т. д.).

Целесообразно представить синтез двумя уровнями: структурным и параметрическим. В результате структурного синтеза определим количество и вид компонентов, составляющих базовую схему панкратического объектива, а в процессе параметрического синтеза – конкретные числовые значения параметров уже созданной структуры. При этом учитываются оптические характеристики ОС, назначение, коррекционные возможности, конструктивные условия построения (габаритные ограничения, получение промежуточного изображения и др.).

Рассмотрим особенности новой структурной модели трехкомпонентной системы переменного увеличения (рис. 1). Для основной композиции примем:

тип оптической системы «0–1» – предмет на бесконечности в пространстве предметов, изображение на конечном расстоянии [6];

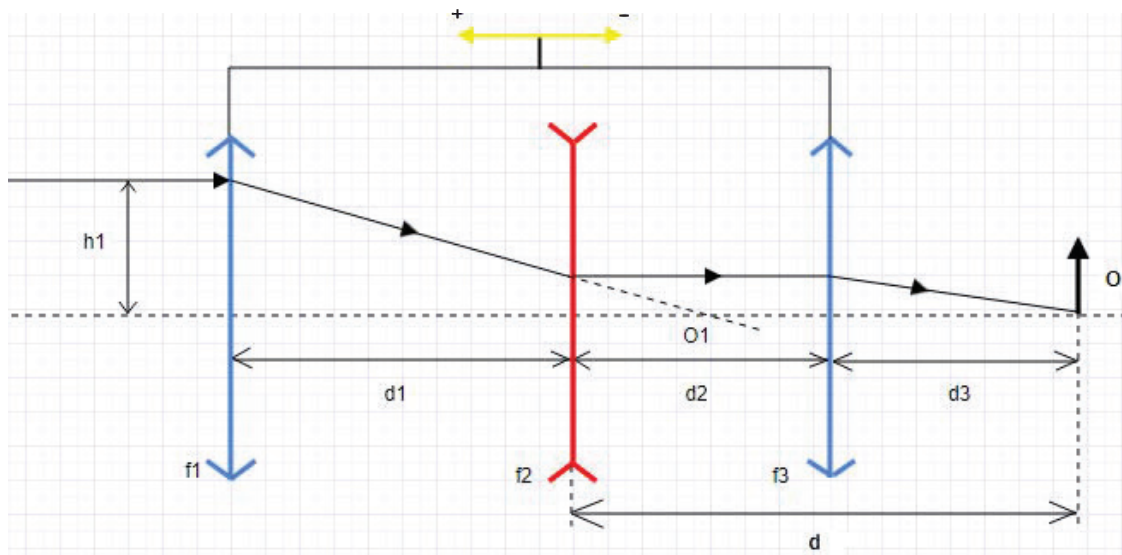


Рис. 1. Оптическая схема трехкомпонентного объектива переменного увеличения

Fig. 1. Schematic of three component zoom lens

состав объектива: три компонента;
 малые габариты за счет подвижного первого компонента;
 второй компонент фиксирован в основной композиции;
 положение второго компонента определено расстоянием между его главной плоскостью и плоскостью изображения $d = d_2 + d_3$.

Основные этапы структурного синтеза следующие:

введение условий нормировки;

расчет и выбор оптических сил трех компонентов (фокусные расстояния f'_1, f'_2, f'_3 могут быть произвольными);

расчет aberrаций 3-го порядка, подлежащих компенсации, для выбора структуры коррекции и оптимизации объектива.

Для параметрического синтеза основной композиции предлагается методика, основанная на следующих формулах, описывающих алгоритм параметрического расчета, в которые входят соответствующие фокусные расстояния; расстояния по оптической оси, линейные увеличения компонентов; отрезки от передней и задней главных точек оптической ОС до осевых точек предмета и изображения:

параксиальный отрезок, определяющий положение плоскости Гаусса [7],

$$a' = (1 - \beta)f';$$

расстояние для неподвижного второго компонента:

$$d = (1 - \beta_2)f'_2 + \left(2 - \beta_3 - \frac{1}{\beta_3}\right)f'_3;$$

формула связи β_2 и β_3 увеличений 2-го и 3-го компонентов:

$$\beta_3 = \frac{f'}{f'_1 \beta_2};$$

осевые расстояния (см. рис. 1)

$$d_2 = (f'_1 - \beta_2 f'_2 f_1'^2 + f'_2),$$

$$d_3 = (1 - \beta_3)f'_3;$$

формула для расчета линейного увеличения β_2

$$(1 - \beta_2)f'_2 + \left(2 - \frac{f'}{f'_1 \beta_2} - f'_1 \frac{\beta_2}{f'}\right)f'_3 - d = 0;$$

основное уравнение трехкомпонентной системы, описывающее закон движения

$$k_1\beta_2^2 + k_2\beta_2 + k_3 = 0, \quad (1)$$

где коэффициенты k_1, k_2, k_3 определяются формулами

$$k_1 = (f_1'^2 f_3' + f_1' f_2' f_3'); \quad k_2 = (f_2' + 2f_3' - d) f_1' f_3'; \quad k_3 = f_3' f_1'^2.$$

Поскольку уравнение (1) является уравнением второго порядка относительно линейного увеличения 2-го компонента β_2 , существуют два решения, но только одно из них дает практический результат с положительными по знаку расстояниями d_2 и d_3 .

Параметрический синтез завершается определением параметра d_1 .

Предложенная методика была использована для расчета вариантов *новой структурной модели трехкомпонентной системы* панкратического объектива. Анализ базовых схем основной композиции позволил установить характеристики для данного типа: коэффициент упрощения системы меньше единицы; небольшой перепад увеличений; два решения с разными параметрами.

Полученные формулы для трехкомпонентной системы можно успешно использовать для расчета композиций из четырех и пяти компонентов. Для расчета сложных систем переменного увеличения были использованы некоторые положения метода гауссовых скобок [8]. Отметим, что область применения предложенной методики можно расширить как по количеству компонентов, так и для объективов дискретного типа. В этом случае в алгоритме будут изменения в законах движения компонентов, а для объективов дискретного типа необходимы дополнительные формулы. Расчет объектива с дискретным изменением фокусного расстояния представляет значительный интерес.

Было получено основное уравнение четырехкомпонентной системы, описывающее закон движения

$$a_1\beta_1^4 + a_2\beta_1^3 + a_3\beta_1^2 + a_4\beta + a_5 = 0, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} a_1 &= k_1 B - f_3' - k_1^2 f_3'; \\ a_2 &= k_2 B - \beta f_2' - 2k_1 k_2 f_3'; \\ a_3 &= k_1 B - (2k_1^2 + k_2^2) f_3'; \\ a_4 &= -2k_1 k_2 f_3'; \\ a_5 &= -k_1^2 f_3'. \end{aligned}$$

Для нахождения β_3 служит уравнение

$$d_0 = \left(2 - \beta_1 - \frac{1}{\beta_1} \right) f_1' - \left(\frac{\beta_1 \beta_3}{\beta} - 1 \right) f_2'.$$

Перед решением уравнения (2) относительно β_1 , осуществлен выбор фокусных расстояний f_1', f_2', f_3', f_4' . Далее получим β_3 по формуле

$$\beta_3 = k_1 + \frac{k_2}{\beta_1} + \frac{k_1}{\beta_1^2},$$

где $k_1 = \frac{-f_1'}{f_2'} B$; $k_2 = \frac{2f_1' + f_2' - d_0}{f_2'} B$; $B = 2f_3' + f_2' - D_0'$.

Расстояния d_0, D_0' показаны на рис. 2.

Осевые расстояния между компонентами d_1, d_2, d_3 определены согласно формулам предложенной методики. Процесс решения осуществляется итерационно. Если уравнение (2) не имеет решения, требуется выбрать другие фокусные расстояния для компонентов и повторить шаги вычисления. Такой алгоритм позволил проектировать сложные объективы переменного увеличения с большим перепадом увеличения; получены базовые модули объективов с соответствующим движением компонентов, на основе которых установлены параметры объектива с дискретным изменением фокусного расстояния. В результате анализа габаритного моделирования

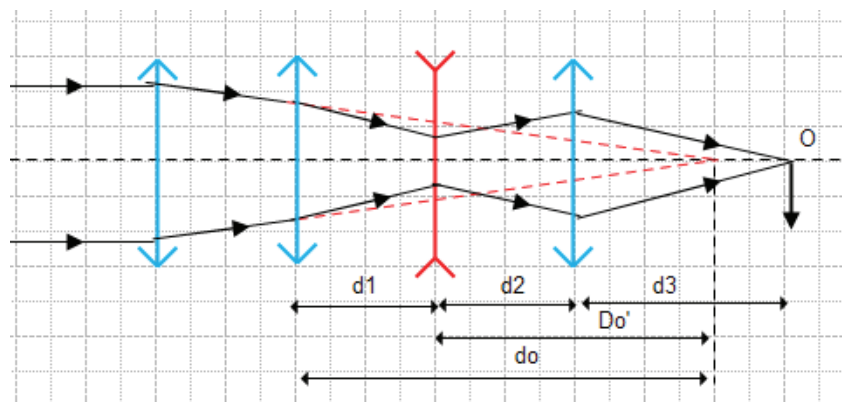


Рис. 2. Оптическая схема четырехкомпонентного объектива переменного увеличения

Fig. 2. Schematic of four component zoom lens

определено, что большой перепад увеличений достигает 10 крат и разделение нагрузки на четыре компонента позволяет увеличить относительное отверстие ОС.

В табл. 1 представлены сравнительные характеристики разработанных базовых модулей на основе предложенной методики.

Т а б л и ц а 1. Результаты разработки панкратических объективов

Table 1. The results of the development of zoom lenses

Сравнение характеристик различных базовых модулей объективов Comparison of the characteristics of different basic modules of objectives				
Тип компенсации изображения Type of compensation	Количество компонентов Number of components	Максимальный перепад увеличения Maximum drop of increase	Коэффициент упрощения Simplification coefficient	Замечания Comments
Оптическая	4	3	1,58	–
Механическая	3	2,1	0,8	1-й и 3-й компонент подвижные
Механическая	3	2,1	1	2-й и 3-й подвижные
Механическая	5	10	1,6	2-й и 4-й подвижные
Механическая	5	8	2	Дискретный объектив

Для проектного расчета был выбран трехкомпонентный объектив (первый и третий компонент подвижные) с механической компенсацией. Рассчитанный панкратический объектив обеспечивает перепад фокусных расстояний f' от 70 до 160 мм и развивает относительное отверстие D/f' в пределах 1 : 2–1 : 6 при угловом поле зрения $2\omega = 4^\circ$ – 2° при удовлетворительном качестве изображения по полю.

Результаты габаритного расчета одной из конструктивных композиций сведены в табл. 2, где Δ – смещение изображения от нулевого состояния.

Т а б л и ц а 2. Результаты параметрического синтеза для четырех положений

Table 2. Results of parametric synthesis for four positions

f' , мм	β_2	d_1 , мм	d_2 , мм	L , мм	Δ , мм
70	0,389	17,19	33,35	67,16	0
90	0,444	41,080	24,2	91,25	0,025
110	0,498	59,39	18,19	109,44	–0,032
160	0,598	84,6	7,11	130	0,099

При расчете радиусов кривизны поверхностей линз отдельных компонентов и введении конечных толщин для различных комбинаций стекол были использованы наиболее эффективные методики расчета [9; 10].

К примеру, рассчитанный первый компонент с оптическими характеристиками: $f' = 135$ мм, диафрагменное число $f' / D = 3,75$, имеющий конструктивные параметры:

радиус, мм	толщина, мм	марка стекла
84,6	2	БФ4
-68,5	2	ТФ13
-178,1		

обеспечивает совершенную коррекцию сферической aberrации и комы 3-го порядка (рис. 3).

Система-		Работа-RT Graph-0 View 13:36 OPAL-PC					
Суммы и aberrации Зейделя							
N	S1	S2	S3	S4	S5	S1xp	S2xp
1	.94233	-.58790	.36677	.56953	-.58361	-.00903	.00000
2	-3.54175	-.88641	-.22185	-.16941	-.09786	.03362	.00032
3	2.58741	1.46168	.82573	.32964	.65242	-.02466	-.00045
sum	-.01201	-.01263	.97066	.72976	-.02905	-.00007	-.00012

Рис. 3. Суммы Зейделя для первого компонента

Fig. 3. Seidel sums for the first component

Компьютерное моделирование данного объектива в программной среде Opal показало, что объектив обладает допустимыми значениями осевых и внеосевых aberrаций ($2\omega = 4^\circ$) для всего диапазона изменения фокусного расстояния (70–145 мм). Получена ортоскопическая коррекция aberrаций (величина относительной дисторсии во всех позициях не превышает 1 %).

Меняя параметр k_2 в уравнении (2), можно составить композицию объектива дискретного типа с большим перепадом увеличения и определенными расстояниями между компонентами в соответствующих диапазонах фокусного расстояния.

Объектив с дискретным изменением фокусного расстояния, показанный на рис. 4, был рассчитан для диапазона фокусного расстояния (11,6–116 мм), диафрагменного числа $f' / D = 1,5$, углового поля зрения $2\omega = 50^\circ$; он имеет габариты порядка 194 мм и обеспечивает перепад 11 крат.

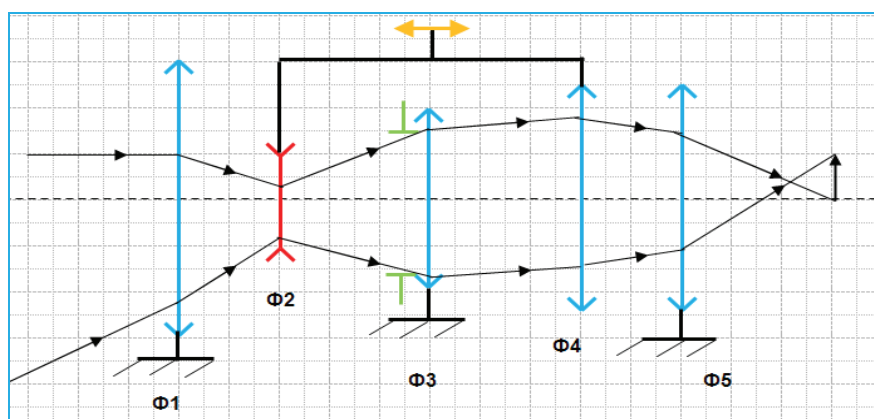


Рис. 4. Схема дискретного объектива с большим перепадом увеличения

Fig. 4. Scheme of a discrete lens with a large magnification

Схема данного объектива с механической компенсацией состоит из трех блоков, работающих на основе уравнения (2), апертурная диафрагма расположена на небольшом расстоянии перед фиксированным третьим компонентом. Функция заднего блока заключается в изменении коэффициента масштабирования компонентов и решении проблемы выбора их фокусных расстояний для эффективного вычисления корней уравнения (2).

Заклучение. В сообщении предложена методика расчета новой структурной модели объектива с переменным фокусным расстоянием. Основная композиция представлена тремя компонентами, два из которых подвижны. Исследованы схемы объективов с механической и оптической компенсацией изображения. Установлено, что композиция с подвижным первым компонентом обеспечивает малые габариты. На основании предложенных формул выбраны параметры композиции с подвижным первым компонентом и дан расчет конструктивных параметров панкратического объектива из трех компонентов, а также объектива дискретного типа с десятикратным перепадом. Установлено, что базовые композиции трехкомпонентной системы панкратического объектива, рассчитанные в диапазоне фокусных расстояний $f' = 160\text{--}70$ мм при относительном отверстии $D/f' = 1 : 2$, поле зрения $2\omega = 40^\circ$, обладают минимальными значениями неизопланизма и сферической аберрации, а также допустимыми значениями волновой аберрации и астигматической разности в спектральном диапазоне $\lambda = 380\text{--}680$ нм. Объективы ахроматизованы при заданной спектральной эффективности.

Методика позволят проектировать сложные объективы переменного увеличения. Область применения предложенной методики можно расширить как по количеству компонентов, так и для объективов дискретного типа.

Проведено габаритное моделирование объектива дискретного типа с перепадом 10^x – базовую схему, которую можно использовать при проектном расчете объектива, работающем в ИК области или для других применений.

Список использованных источников

1. Зверев, В. А. Оптика вооружения и военной техники / В. А. Зверев // Труды Объединенного научного совета по гуманитарным проблемам и историко-культурному наследию. – 2011. – Т. 2010. – С. 105–113.
2. Пахомов, И. И. Панкратические системы / И. И. Пахомов. – М., 1976. – 160 с.
3. Запругаева, Л. А. Расчет и проектирование оптических систем / Л. А. Запругаева, И. С. Свешникова. – М., 2000. – 584 с.
4. Clerk, A. D. Zoom lenses / A. D. Clerk. – London, 1973. – 88 p.
5. Русинов, М. М. Композиция оптических систем / М. М. Русинов. – Л., 1989. – 383 с.
6. Шкадаревич, А. П. О классификационных основах процедуры структурного синтеза оптических систем / А. П. Шкадаревич, Н. К. Артюхина // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2015. – Т. 59, № 6. – С. 52–56.
7. Артюхина, Н. К. Теория и расчет оптических систем / Н. К. Артюхина. – Минск, 2004.
8. Herzberger, M. Gaussian Optics and Gaussian brackets / M. Herzberger // Journal of the Optical Society of America. – 1943. – Vol. 33, N 12. – P. 651–655. <https://doi.org/10.1364/josa.33.000651>
9. Mikš, A. Method of zoom lens design / A. Mikš, J. Novák, P. Novák // Applied Optics. – 2008. – Vol. 47, N 32. – P. 6088. <https://doi.org/10.1364/ao.47.006088>
10. Кириченко, Е. В. Принцип построения ОС из бесконечно тонких компонентов / Е. В. Кириченко // Оптико-механическая промышленность. – 1978. – № 9. – С. 17–23.

References

1. Zverev V. A Optics of weapons and military equipment. *Trudy Ob'edinennogo nauchnogo soveta po gumanitarnym problemam i istoriko-kul'turnomu naslediyu* [Collective Works of the Joint Scientific Council on Humanitarian Problems and Historical and Cultural Heritage], 2011, vol. 2010, pp. 105–113 (in Russian).
2. Pakhomov I. I. *Varifocal systems*. Moscow, 1976. 160 p. (in Russian).
3. Zapryagaeva L. A., Sveshnikova I. S. *Calculation and design of optical systems*. Moscow, 2000. 584 p. (in Russian).
4. Clerk A. D. *Zoom lenses*. London, 1973. 88 p.
5. Rusinov M. M. *Composition of optical systems*. Leningrad, 1989. 383 p. (in Russian).
6. Shkadarevich A. P., Artiukhina N. K. Classification bases of the structural synthesis of optical systems. *Doklady National'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2015, vol. 59, no. 6, pp. 52–56 (in Russian).
7. Artyukhina N. K. *Theory and calculation of optical systems*. Minsk, 2004 (in Russian).
8. Herzberger M. Gaussian Optics and Gaussian brackets. *Journal of the Optical Society of America*, 1943, vol. 33, no. 12, pp. 651–655. <https://doi.org/10.1364/josa.33.000651>
9. Mikš A., Novák J., Novák P. Method of zoom lens design. *Applied Optics*, 2008, vol. 47, no. 32, pp. 6088. <https://doi.org/10.1364/ao.47.006088>
10. Kirichenko E. V. The principle of OS construction from infinitely thin components. *Optical and mechanical industry*, 1978, no. 9, pp. 17–23 (in Russian).

Информация об авторах

Шкадаревич Алексей Петрович – академик, д-р физ.-мат. наук, профессор, директор. Лазеры в экологии, медицине и технологии БелОМО (ул. Макаенка, 23, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shkad@lemt.by.

Артюхина Нина Константиновна – д-р техн. наук, профессор. Белорусский национальный технический университет (ул. Я. Коласа, 22, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: art4913@rambler.ru.

Альмахмуд Шуаиб Хассан. Университет Аль-Баат (Хомс, Сирия). E-mail: shoae8888@gmail.com.

Information about the authors

Shkadarevich Alexey Petrovich – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Director. Lasers in Ecology, Medicine and Technology BelOMO (23, Makaenok Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shkad@lemt.by.

Artsiukhina Nina Konstantinovna – D. Sc. (Engineering), Professor. Belarusian National Technical University (22, Ya. Kolas Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: art4913@rambler.ru.

Almahmoud Shoaeb Hasan. Al-Bath University (Homs, Syrian Arab Republic). E-mail: shoae8888@gmail.com.