

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-40-51

УДК 535.317

Стратегия проектирования и управление процессом коррекции аберраций объектива с высоким индексом сложности

Ирина Леонидовна Лившиц¹, Татьяна Вячеславовна Точилина^{2✉}, Оливер Фаенле³,
 Светлана Леонидовна Волкова⁴

^{1,2} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

³ PanDao GmbH, Санкт-Галлен, 9016, Швейцария

⁴ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация

¹ ecenter-optica10@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3256-1481>

² tvtochilina@itmo.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-4173-8864>

³ olifaehnle@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3090-7813>

⁴ svetlanavolkova2008@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2192-9818>

Аннотация

Предмет исследования. Определена стратегия проектирования оптических изображающих систем, заключающаяся в объединении различных методов проектирования и основанная на теории структурного и параметрического синтеза, обеспечивающая наличие необходимых коррекционных параметров в исходной оптической системе. Рассмотрено управление коррекцией остаточных аберраций за счет использования коррекционных возможностей схемы. Предложены композиция оценочной функции, рекомендации по автоматизированной коррекции аберраций, расчет допусков на изготовление оптической системы, а также процедура принятия решения по выбору лучшего варианта оптической схемы. **Метод.** Стратегия базируется на анализе свойств оптических изображающих систем и их классификации с последующим определением индекса сложности системы, а также на классификации аберраций и разработке методов их коррекции. **Основные результаты.** Предложен алгоритм реализации стратегии, созданный на понимании свойств оптической системы и ее коррекционных возможностей. Выполнен анализ технического задания проектирования для определения индекса сложности оптической изображающей системы, выбор оптимальной схемы и определены коррекционные возможности схемы. Рассмотрена композиция оценочной функции. Проведено сравнение оценочной функции «по умолчанию» и функции, составленной пользователем с учетом рекомендаций, предложенных в настоящей работе. **Практическая значимость.** Реализация предложенной стратегии создает условия для сокращения времени проектирования, особенно для систем повышенной сложности с форсированными техническими характеристиками. Представлена блок-схема алгоритма, определены его параметры и коррекционные возможности. Проведена автоматизированная коррекция на основе полученных рекомендаций. Рассчитаны допуски на изготовление и определен уровень технологичности.

Ключевые слова

стратегия проектирования, оптические системы, аберрации, методы коррекции аберраций, оценочная функция, коррекция, допуски

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов People Programme (Marie Curie Actions) Седьмой рамочной программы Европейского Союза: № 608082 (Тема № FP7-PEOPLE-2013-ITN «ADOPSYS»), № 288526 (Тема № FP7-ICT-2011-7 «SMETHODS»).

Ссылка для цитирования: Лившиц И.Л., Точилина Т.В., Фаенле О., Волкова С.Л. Стратегия проектирования и управление процессом коррекции аберраций объектива с высоким индексом сложности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 1. С. 40–51. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-40-51

Design strategy and management of aberration correction process for lens with high complexity index

Irina L. Livshits¹, Tatiana V. Tochilina²✉, O. Faehnle³, Svetlana L. Volkova⁴

^{1,2} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

³ PanDao GmbH, St. Gallen, 9016, Switzerland

⁴ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation

¹ ecenter-optica10@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3256-1481>

² tvtochilina@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4173-8864>

³ olifaehnle@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3090-7813>

⁴ svetlanavolkova2008@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2192-9818>

Abstract

Subject of Research. The strategy of designing optical imaging systems is defined, which consists in combining various design methods and is based on the theory of structural and parametric synthesis, ensuring the presence of the necessary correction parameters in the original optical system. The control of the correction of residual aberrations by using the correction capabilities of the scheme is considered. The composition of the evaluation function, recommendations for automated aberration correction, calculation of tolerances for the manufacture of an optical system, as well as the decision-making procedure for choosing the best optical scheme option are proposed. **Method.** The strategy is based on the analysis of the properties of optical imaging systems and their classification, followed by the determination of the system complexity index, as well as on the classification of aberrations and the development of methods for their correction. **Main Results.** An algorithm is proposed for implementing the strategy based on understanding the properties of the optical system and its correction capabilities. Analysis of the design specification for determining the complexity index of the optical imaging system, the choice of the optimal scheme and the correction capabilities of the scheme are determined. The composition of the evaluation function is considered. The “default” function evaluation and the function compiled by the user are compared taking into account the recommendations proposed in this paper. **Practical Relevance.** The implementation of the proposed strategy creates conditions for reducing the design time, especially for systems of increased complexity with forced technical characteristics. An algorithm flowchart is presented, its parameters and correction capabilities are determined. Automated correction is carried out based on the received recommendations. The tolerances for manufacturing are calculated and the level of its manufacturability is determined.

Keywords

design strategy, optical systems, aberrations, aberration correction methods, evaluation function, correction, tolerances

Acknowledgements

The research was supported by People Program grants (Marie Curie Actions) of the Seventh European Union Framework Program: No. 608082 (Topic No. FP7-PEOPLE-2013-ITN “ADOPSYS”) and No. 288526 (Topic No. FP7-ICT-2011-7 “SMETHODS”).

For citation: Livshits I.L., Tochilina T.V., Faehnle O., Volkova S.L. Design strategy and management of aberration correction process for lens with high complexity index. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 40–51 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-40-51

Введение

Оптические системы (ОС) используются во всех сферах жизни человека, поэтому вопросы их проектирования остаются актуальными на протяжении нескольких столетий со времени появления первых систем. Схемные решения и методы проектирования постоянно совершенствуются. Особенно большой прогресс наблюдается при автоматизации проектирования, когда компьютерные технологии и соответствующее специализированное программное обеспечение (ПО) стало использоваться для ОС.

Однако при увеличении в миллионы раз скорости расчета прохождения лучей через ОС по сравнению с ручными расчетами, количество вариантов ОС выросло незначительно. А количество успешно рассчитанных оптических схем до сих пор незначительно. Этот факт объясняется тем, что в теории и практике оптического проектирования большое значение играет выбор исходной ОС, называемой также «стартовой точкой». На протяжении длительного времени выбор стартовой точки осуществлялся оптиком-разработчиком. В последнее

время появляется все больше работ [1–5], посвященных автоматизации проектирования, в основном за счет использования систем искусственного интеллекта: экспертных систем [1, 2, 5], генетических алгоритмов, нейронных сетей. Время от времени в технической литературе появляются прогнозы полной автоматизации оптических расчетов.

Тем не менее функцией оптика-разработчика остается, прежде всего, выбор исходной оптической схемы [6], управление автоматизированной коррекцией остаточных aberrаций, композиция оценочной функции и процедуры принятия решений на всех этапах проектирования. Компьютерные технологии, с одной стороны, освободили человека от кропотливой рутинной работы, а с другой стороны усложнили его профессиональную деятельность, предоставив ему в ряде случаев слишком много информации и слишком много вариантов, которые предстоит проанализировать. Это усложняет процесс выбора оптимальной оптической схемы и процедуру принятия решения. Требуется разработать некоторые понятные критерии, помогающие эту задачу решить, одним из которых может быть, например, стои-

мость производства ОС, рассчитанная также по специальным программам PanDao¹. Очевидно, что стоимость изготовления зависит от количества и типа оптических компонентов, их материала и допусков на изготовление. Все перечисленные факторы определяются на стадии оптического проектирования. Таким образом, круг замкнулся, и процесс выбора опять возвращается на первый этап — выбор стартовой точки. Несмотря на очевидную привлекательность и совершенствование ПО для проектирования ОС, необходимо также сохранять и развивать участие разработчика на всех этапах проектирования. По мнению авторов, этот процесс будет успешным при условии гармоничного сочетания теории и практики проектирования, анализа накопленного опыта и в идеале — создание экспертных систем, содержащих базы данных всех удачных технических решений.

В настоящей работе предложена стратегия проектирования изображающих ОС. Если взглянуть на оптическую схему любого объектива, возникает вопрос, почему она именно такая, каким образом были выбраны оптические элементы и от чего зависит их количество и взаимное расположение. Ответ на этот вопрос дает теория структурного синтеза и композиции ОС [7, 8].

Определяющим является этап выбора стартовой точки, поскольку при удачном выборе результат достигается значительно быстрее за счет более быстрой сходимости процесса оптимизации, при условии, что в схему изначально заложены необходимые коррекционные возможности. В случае неудачного выбора схемы требуемый результат, как правило, не достигается.

Теория синтеза, предложенная М.М. Русиновым [7, 8] предлагает начинать проектирование ОС с одного базового элемента, затем осуществлять усложнение, добавляя необходимые функциональные элементы. По предложению профессора М.М. Русинова, синтез самих элементов проводится из оптических поверхностей с заданными аберрационными свойствами. Аналогичный метод был предложен американским инженером-оптиком Давидом Шефером [9].

Прошло более 40 лет с момента создания теории профессора М.М. Русинова. Применение предложенных им принципов получает дальнейшее развитие в работах его учеников [1, 10–16]. На стадии выбора исходной ОС выполняется построение ОС из элементов с известными свойствами, затем эти свойства постепенно отменяются, и далее используются поверхности как дополнительные параметры оптической схемы. Однако при этом важно сохранять понимание процессов синтеза схемы и коррекции аберраций и управлять ими, а не идти «на поводу» у программы автоматизированной коррекции. Это достигается путем создания оценочной функции, позволяющей разработчику управлять процессом оптимизации. Пример конструирования оценочной функции также приведен в настоящей работе.

Материалы обобщают опыт и методики, накопленные при проведении обучающих тренингов по проек-

тированию оптических изображающих систем в рамках международного гранта SMETHODS² и ADOPSYS³, а также при выполнении большого количества научно-исследовательских разработок по проектированию ОС, выполняемых в Университете ИТМО [14–16].

Стратегия процесса проектирования оптической системы

Под стратегией проектирования будем понимать определенную последовательность действий, выбираемых проектировщиком с целью преобразования исходного технического задания (ТЗ) в готовый проект (оптическую систему).

В технике существует несколько типов стратегий: линейная, разветвленная, циклическая, адаптивная и случайный поиск (табл. 1).

При проектировании ОС возможно использование различных типов стратегий, однако, на современном уровне развития оптических технологий наиболее популярным является сочетание циклической и адаптивной стратегий.

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма реализации стратегии проектирования изображающей ОС.

Любой из этапов алгоритма заканчивается процедурой принятия решений о целесообразности дальнейшей возможности продолжения работ с конкретным вариантом выбранной стартовой точки.

Существуют два принципиально различных подхода по выбору стартовой точки:

- 1) *восходящая* стратегия — «снизу-вверх» — когда количество элементов в ОС развивается постепенно от одного базового элемента до необходимого количества элементов в схеме, определяемого индексом сложности ОС [2];
- 2) *нисходящая* стратегия — «сверху-вниз» — когда стартовая точка выбирается из существующих аналогов ОС, близких к характеристикам ТЗ.

Результаты сравнения подходов представлены в табл. 2.

При проектировании ОС оценивается качество изображения стартовой точки, которое корректируется за счет управления процессом коррекции аберраций, и в совокупности образует оценочную функцию ОС.

Различают следующие стратегии коррекции аберраций, которыми пользуются разработчики в зависимости от своего опыта работы и уровня сложности ОС:

- 1) *эвристическая* — используется опытными пользователями на основании накопленного личного опыта собственных разработок. Как правило, исследуется влияние параметров системы, а затем создается оценочная функция, и задача передается в программу автоматического проектирования;
- 2) *детерминированная* — при условии, что существуют методы решения конкретной задачи в аналити-

² Smethods [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cordis.europa.eu/project/id/288526>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 10.01.2021).

³ ADOPSYS [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cordis.europa.eu/project/id/608082>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 10.01.2021).

¹ PanDao [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.pandao.ch>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 10.01.2021).

Таблица 1. Типы стратегий проектирования

Table 1. Types of design strategies

Линейная	Разветвленная	Циклическая	Адаптивная	Случайный поиск
Каждое действие зависит от исходов предыдущего и не зависит от результатов последующего	Поэтапное сопоставление вариантов проектов, которые могут развиваться независимо друг от друга	Позволяет возвращаться к одному из предыдущих этапов конструирования	Предусматривает лишь начальное проектное действие, а выбор последующих действий зависит от результатов предыдущих	Выбирается случайное решение

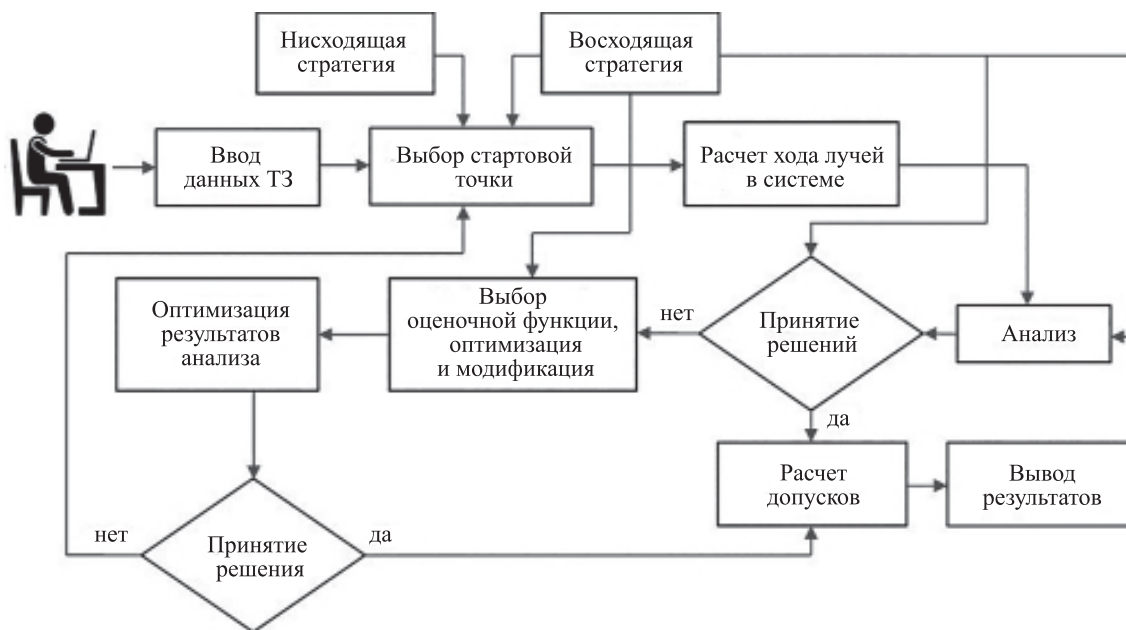


Рис. 1. Блок-схема алгоритма реализации стратегии проектирования изображающей оптической системы

Fig. 1. An algorithm flowchart for implementing the design strategy of the imaging optical system

Таблица 2. Сравнение подходов к выбору стартовой точки

Table 2. Comparison of approaches to the choice of a starting point

Стратегия выбора стартовой точки	Достоинства	Недостатки	Комментарий
Восходящая – «Снизу-вверх»	Гарантируется наличие необходимых параметров	Занимает больше времени	Чаще используется опытными разработчиками
Нисходящая – «Сверху-вниз»	В случае наличия параметров результат достигается быстрее	Параметры присутствуют не всегда	Чаще используется новичками

ческом выражении, например, с использованием теории Зейделя, Цернике и т. д.;

- 3) автоматическая — использование расчетных методов и техник, когда задача целиком решается компьютером [4].

Следует отметить, что в последнее десятилетие наметилась стойкая тенденция использовать новые стратегии, основанные на технологиях искусственного интеллекта, включая экспертные системы, нейронные сети — «deep learning» (глубокого обучения), генетические алгоритмы. Это, безусловно, современные технологии, которые базируются на предыдущем опыте поколений разработчиков и не отменяют необходимости понимания базовых теоретических основ. Они еще

более усиливают необходимость осознанного принятия решения человеком, который получает огромное количество информации об ОС, что затрудняет ему выбор окончательного варианта. В связи с этим разрабатываются новые критерии и новое ПО, избавляющее разработчика от рутины. Например, ПО PanDao¹, позволяет уже на стадии проектирования определить вариант, лучший с точки зрения технологии его производства. Проводится сравнение среди 200 технологических процессов изготовления ОС.

¹ PanDao [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.pandao.ch>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 10.01.2021).

Наряду со стратегиями коррекции aberrаций различают типы коррекции, понимание которых полезно для управления процессом проектирования ОС.

Типы коррекции

1. Дробление — распределение aberrационной нагрузки, приходящейся на один оптический компонент (обычно — поверхность) или на несколько компонентов. Пример — коррекция сферической aberrации в конденсоре.
2. Компенсация — компенсация aberrации одного знака введением в ОС элемента, содержащего aberrацию противоположного знака. Пример — компенсация отрицательной сферической aberrации положительной линзы введением в систему отрицательной линзы, содержащей положительную сферическую aberrацию.
3. Использование поверхностей, свободных от aberrаций — метод Русинова–Шефера [7–9].
4. Использование средств симметрии и подобия — известно, что симметричные системы автоматически становятся свободными от четных aberrаций — комы, дисторсии, хроматизма увеличения. Применение принципа подобия — когда радиусы, толщины линз и воздушные промежутки умножаются на коэффициент подобия, за счет чего снижается aberrационная нагрузка и aberrации уменьшаются. Эти свойства особенно часто применялись при расчете фотографических объективов.
5. Асферизация — увеличение числа параметров в оптической схеме за счет изменения формы линз на асферическую. Параметрами будут коэффициенты уравнения поверхности.
6. Поверхности свободной формы — аналогично асферизации — дополнительными параметрами которой, кроме изменения формы поверхности, будут еще и изменения ее положения в пространстве.
7. Изменение положения апертурной диафрагмы (входного и выходного зрачков) — сильное средство коррекции особенно aberrаций главного луча.

«Золотое правило» коррекции aberrаций

«Золотое правило» коррекции — коррекционный элемент для коррекции конкретной aberrации наиболее эффективен в том месте оптической схемы, где высота падения соответствующего луча, для которого рассчитывается эта aberrация, — максимальная.

Пример проектирования объектива типа рыбий глаз

Для выбора исходной оптической схемы проанализируем ТЗ и составим табл. 3, в которой данные ТЗ представлены в удобном для разработчика виде [2, 5], где J — светосила; W — угловое поле; F — фокусное

расстояние; L — рабочий диапазон длин волн; Q — функция качества; S — относительный задний фокальный отрезок; D — положение апертурной диафрагмы; R — индекс сложности ОС.

Индекс сложности оптической системы

Важной характеристикой, определяющей выбор исходных схем ОС, является индекс сложности, т. е. алгебраическая сумма чисел, представляющих собой обобщенные характеристики объектива:

$$R = \Sigma(J + W + F + L + Q + S + D).$$

Индекс сложности может изменяться в пределах 0–14, где «0» соответствует самой простой оптической схеме, а «14» — максимально сложной. Исходя из практических знаний оптиков-экспертов, система считается сложной, если индекс больше $R > 7$. Для реализации сложных ОС обычно требуется создание принципиально нового схемного решения, которое в дальнейшем может быть запатентовано.

Теория синтеза и композиции профессора М.М. Русина позволила синтезировать объектив рыбий глаз.

Параметрический синтез с целью получения требуемых по ТЗ технических характеристик проводится путем изменения параметров толщин и воздушных промежутков в объективе, при этом свойства поверхностей оставляем без изменения. На рис. 2 показан рабочий экран компьютера. Серым цветом выделены поверхности, сохраняющие свои свойства. На рис. 3 — стартовая точка оптической схемы объектива типа рыбий глаз.

Все поверхности объектива являются поверхностями с известными свойствами (рис. 2): апланатическими и концентричными центру апертурной диафрагмы. Убедимся, что она свободна от комы и астигматизма. Материалом для отрицательных линз будет флинт Ф1, а для положительных — К8. Выбранные стекла имеют близкие по значению показатели преломления и большую разницу в коэффициентах дисперсии.

В табл. 4 представлены типы оптических элементов структурного синтеза.

На основании рис. 3 и табл. 4, формула структурного синтеза объектива типа рыбий глаз с индексом сложности 9 выглядит следующим образом:

$$S(ap) + K(pp) + B(ap) + 2C(ap),$$

где $S(ap)$ — элемент для развития углового поля; $K(pp)$ — коррекционный элемент; $B(ap)$ — базовый элемент; $C(ap)$ — элемент для развития относительного отверстия; a — апланатическая поверхность; p — поверхность, концентричная центру апертурной диафрагмы.

Таблица 3. Представление технического задания в виде основных характеристик оптической системы

Table 3. Technical requirements presented in the form of the main characteristics of the optical system

Характеристики	J	W	F	L	Q	S	D	R
Технические	F2.8	84	4,5	Визуальные	Дифракционные	7	Внутри ОС	—
Обобщенные	2	2	0	1	2	2	0	9

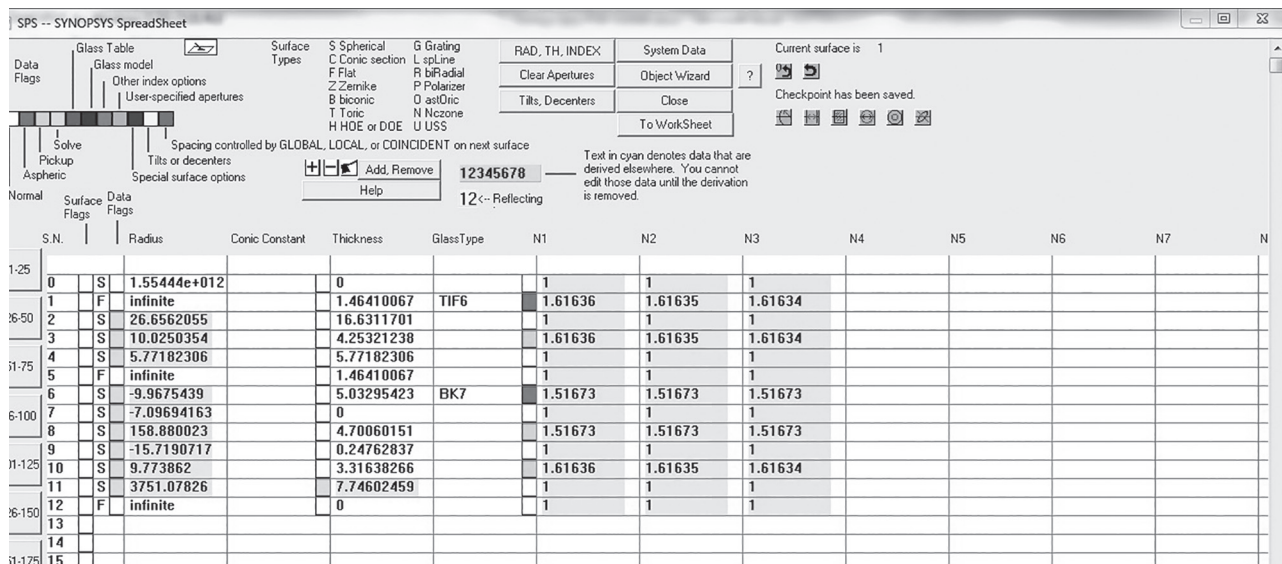


Рис. 2. Рабочий экран компьютера с синтезированным объективом рыбий глаз
 Fig. 2. Working computer screen with a fish-eye synthesized lens

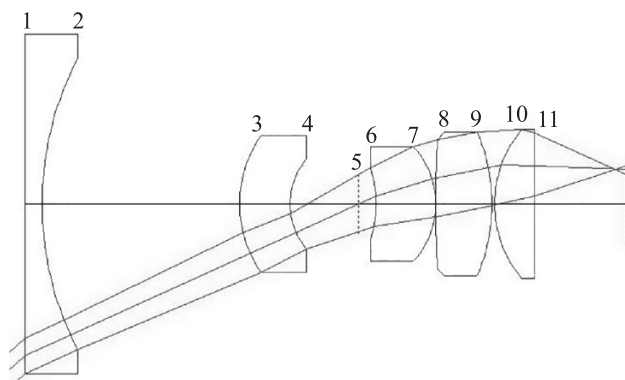


Рис. 3. Исходная оптическая схема (стартовая точка) для объектива типа рыбий глаз: 1, 6, 8, 10 — апланатические поверхности; 2, 3, 4, 7, 9, 11 — поверхности, концентричные центру апертурной диафрагмы; 5 — поверхность апертурной диафрагмы

Fig. 3. Initial optical scheme (starting point) for a fish-eye lens: 1, 6, 8, 10 — aplanatic surfaces; 2, 3, 4, 7, 9, 11 — surfaces concentric to the center of the aperture diaphragm; 5 — surface of the aperture diaphragm

Объектив имеет минимальное количество компонентов — всего 5 линз, за счет использования предлагаемого метода. На рис. 4 представлены графики абер-

раций объектива рыбий глаз. Расчеты производились по специализированной программе Synopsys¹. В табл. 5 даны значения аберраций 3-го порядка, подтверждающие отсутствие комы и астигматизма.

Из табл. 5 следует, что в системе отсутствует кома и астигматизм, имеются отрицательная сферическая аберрация, кривизна поля и дисторсия. Объектив имеет небольшие аберрации 5-го порядка. Это свойство характерно для всех объективов, состоящих из поверхностей с известными свойствами.

Из сравнения в табл. 5 видно, что аберрации 3-го и 5-го порядков имеют разные знаки. Происходит небольшая компенсация аберраций.

Однако этой компенсации недостаточно для обеспечения высокого качества изображения, система не обладает достаточным количеством параметров, необходимых для коррекции всех его остаточных аберраций. Дальнейшая стратегия будет заключаться в том, чтобы «освободить» параметры и добавить их в файл оценочной функции.

¹ Synopsys [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.synopsys.com/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 10.01.2021).

Таблица 4. Типы оптических элементов для структурного синтеза
 Table 4. Types of optical elements for structural synthesis

Название элемента	Знак оптической силы	Функциональное назначение	Количество элементов в системе
Базовый <i>B</i>	«+»	Создание оптической силы	1
Коррекционный <i>K</i>	«+», «-», «0» – в зависимости от типа корригируемых аберраций	Коррекция аберраций	3 на каждой позиции
Широкоугольный <i>S</i>	«-» или «0»	Развитие поля	3
Светосильный <i>C</i>	«+»	Развитие апертуры	3

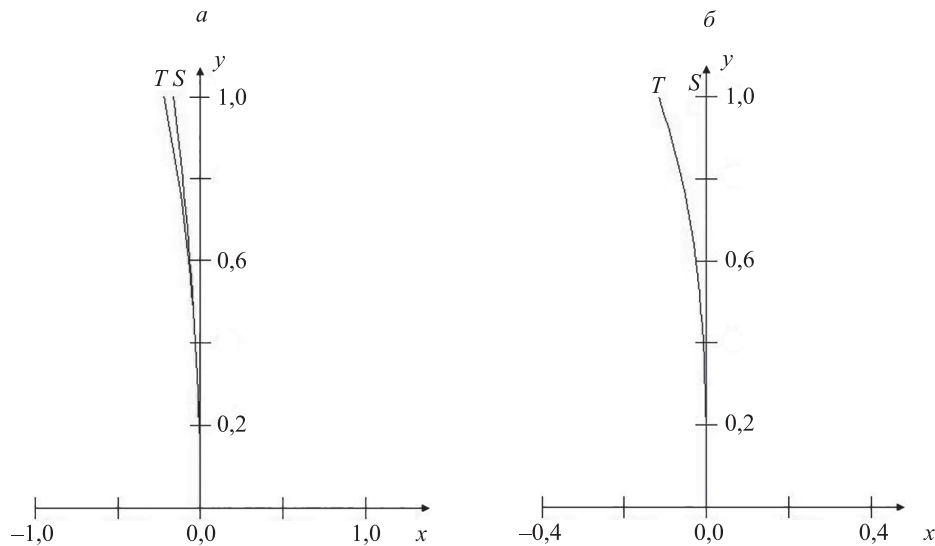


Рис. 4. Графики остаточных aberrаций стартовой точки объектива рыбий глаз: астигматизм (а); дисторсии (б), где: по оси x — продольный астигматизм в сагиттальном (S) и меридиональном (T) сечениях, мм; по оси y — относительные значения углового поля (от нуля (точка на оси) до 1,0 (максимальное значение углового поля))

Fig. 4. Graphs of residual aberrations of the lens starting point: astigmatism (a); distortions (b), where: on the x -axis — longitudinal astigmatism in the sagittal (S) and meridional (T) cross-sections, mm; on the y -axis — relative values of the angular field (from zero (a point on the axis) to 1.0 (the angular field maximum value))

Таблица 5. Значения aberrаций 3-го и 5-го порядков для объектива типа рыбий глаз

Table 5. The 3rd and 5th order aberration values for fish-eye lens

Названия aberrаций	Аберрации 3-го порядка		Аберрации 5-го порядка	
	обозначение	величина	обозначение	величина
Сферическая	СА3	-0,09081	СА5	-0,00551
Кома	КО3	0	КО5	0,0048
Тангенциальный астигматизм	ТА3	-0,04551	ТА5	0,0028
Сагиттальный астигматизм	СА3	-0,04551	СА5	0,022
Кривизна поля	ПЕТЦ3	-0,04551	ПЕТЦ5	0,0278
Дисторсия	ДИС3	-0,30032	ДИС5	0,1530

Управление коррекцией aberrаций и композиция оценочной функции

Под оценочной функцией понимают некоторое число, которое описывает совокупность всех требований к ОС, перечисленных в ТЗ. Файл, описывающий оценочную функцию, также содержит средства, которыми достигается уменьшение оценочной функции.

Оценочная функция присутствует во всех специализированных программах для расчета ОС, однако в каждой из них задается по-своему. В настоящей работе авторы использовали ПО SYNOPSIS, OSD, Inc¹.

Чтобы выбрать оценочную функцию, следует определить файл параметров, желаемое значение функций, и обеспечить их контроль во время оптимизации. Идеальное значение оценочной функции — нуль — не достигается никогда, но задача оптимизации и состоит

в минимизации оценочной функции в рамках принятых технологических ограничений.

Часто процесс составления или выбора оценочной функции называют ее **композицией**, и это наиболее подходящее понятие, так как эта функция является весьма сложной и включает в себя полную стратегию коррекции aberrаций, достижение конструктивных требований и многое другое. Говорят, что весь процесс проектирования можно свести к двум его важнейшим составляющим — композиции стартовой точки ОС и ее оценочной функции, которые являются наиболее творческими операциями; все остальные процессы можно поручить компьютеру [13].

Дополнительное количество коррекционных параметров можно получить за счет отказа от свойств элементов — концентричности и апланатичности, а также учитывая параметры всех радиусов поверхностей, кроме 1-го и 5-го, которые являются плоскостями диафрагм.

Задача оптимизации относится к классу многомерных, количество функций (целей) в которых обычно

¹ Optical Systems Design [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://osdoptics.com/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 10.01.2021).

меньше, чем количество параметров. Как было показано выше, количество возможных параметров определяет разработчик объектива.

Таким образом, функции разработчика при оптимизации следующие:

- построение и «настройка» оценочной функции;
- выбор функций для оптимизации (например, габаритные характеристики, определенные виды аберраций и др.);
- назначение параметров (например, радиуса, толщины, воздушных промежутков между элементами, коэффициентов асферических поверхностей и др.);
- определение весовых характеристик функции;
- определение граничных условий для параметров;
- выбор числа допустимых шагов оптимизации;
- запуск процесса оптимизации;
- управляемый останов процесса оптимизации в случае необходимости;
- принятие решения о продолжении или прекращении процесса оптимизации (если принято решение продолжить оптимизацию, разработчик, как правило, уточняет начальную оценочную функцию).

Итак, оценочная функция составлена, и разработчик начинает первый шаг оптимизации от стартовой точки ОС. Его навыки и интуиция зависят от опыта, который приобретается на протяжении ряда лет практической работы. ПО предоставляет различные алгоритмы оптимизации, однако даже молниеносной работы современных программных оптимизаторов недостаточно для достижения успеха, и проектировщику по-прежнему необходимо руководствоваться своим опытом и для достижения цели пройти через большое количество мелких локальных минимумов для получения желаемого результата.

Процесс оптимизации

Если индекс сложности ОС $R < 7$ [2, 5], возможно использовать оценочную функцию, рекомендованную по умолчанию, для более сложных систем пользователь должен составлять свою оценочную функцию. В рассматриваемом примере имеем $R = 9$ (табл. 3).

Примеры параметров рекомендованной [17] и разработанной пользователем оценочной функции и аберраций для системы рыбий глаз рассчитаны с помощью программы SYNOPSIS и определены в файле параметров PANT (табл. 6) и в файле аберраций AANT (табл. 7).

Существует большое количество специализированного ПО для расчета ОС, которое исследует сотни или тысячи локальных минимумов за считанные минуты и подбирает варианты проектной формы. Этот поиск очень чувствителен к начальным условиям. Главное преимущество поиска — программа может очень быстро предложить множество потенциальных решений и добавить в процесс совершенно новое измерение. В табл. 7 показан лишь пример составляющих оценочной функции, реально она содержит значительно больше строк для ее полного описания.

На рис. 5 показаны астигматические кривые, подтверждающие высокое качество аберрационной коррекции астигматизма и кривизны поля — это особо важные аберрации для объективов типа рыбий глаз.

Расчет допусков на изготовление. Процедура полностью автоматизирована за исключением того, что разработчик задает критерии, которые необходимо выполнить после того, как оптическая схема будет изготовлена. Анализ допусков позволяет оценить технологичность изделия и стоимость его производства.

Таблица 6. Пример описания коррекционных параметров оптической системы

Table 6. Description example of an optical system correction parameters

Наименование параметров	Расшифровка
PANT	Файл параметров
VLIST RAD ALL	Параметрами являются все радиусы оптической системы
VLIST TH ALL EXP 1 5	Параметрами являются все толщины и воздушные промежутки оптической системы, кроме 1-ой и 5-ой
VLIST GLM ALL	Параметрами являются все модели стекол оптической системы
END	Конец

Таблица 7. Пример описания коррекционных функций оптической системы

Table 7. Description example of an optical system correction functions

Номер	Наименование функции	Расшифровка
1	AANT P	Файл функций
2	AEC, ACC	Контроль толщины по краю и по центру
3	GSR .5 10 5 P 0	Генерация матрицы лучей, проходящих через ОС в сагиттальном сечении для пучка лучей 0,5 от заданного углового поля
5	M 4.5 5 A FOCL	Управление значением фокусного расстояния, его подгонка к величине 4,5 мм
6	M 0 20 A SA3	Минимизация сферической аберрации 3-го порядка как составляющей оценочной функции
7	ECP	Контроль толщины положительной линзы по краю

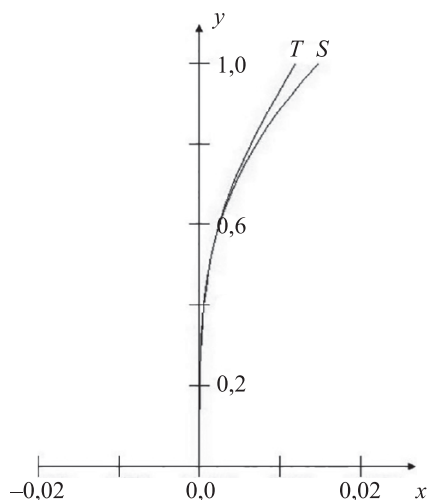


Рис. 5. Астигматические кривые объектива после оптимизации, где: по оси x — продольный астигматизм в сагиттальном и меридиональном сечениях, мм; по оси y — относительные значения углового поля (от нуля (точка на оси) до 1,0 (максимальное значение углового поля))

Fig. 5. Astigmatic curves of the lens after optimization, where: on the x -axis — longitudinal astigmatism in the sagittal and meridional cross-section, mm; on the y -axis — relative values of the angular field (from zero (a point on the axis) to 1.0 (the angular field maximum value))

Расчет допусков проводился с помощью программы SYNOPSIS по методу Монте-Карло [18], который является стандартной операцией, необходимой для выпуска рабочих чертежей оптических деталей.

Процедура принятия решения. Процедура чисто эвристическая и выполняется только человеком на основе достаточно большого объема информации, предоставленной специализированной программой расчета допусков. Рассчитанные допуски сравниваются с допусками, существующими на предприятии, где данный прибор будет изготавливаться. Если рассчитанные допуски более свободные, чем допуски на производстве, принимается решение об окончании расчета настоящего проекта. Иногда полезно предварительно рассчитать ориентировочную стоимость изготовления, которая будет своеобразной оценочной функцией технологичности ОС [19]. Последний этап — выпуск рабочих чертежей и передача прибора в производство.

Оценка качества изображения объектива рыбий глаз. Наиболее универсальным и наглядным методом оценки качества изображающих систем являются частотно-контрастные характеристики (ЧКХ), при этом их значения сравнивают с дифракционным пределом. Эффективным способом улучшения качества aberrационной коррекции является включение ЧКХ в состав оценочной функции при оптимизации (табл. 8).

Пример оптимизации по ЧКХ:

```

M  TAR  WT  ICOL  XMTF  HBAR  C/MM  GBAR
      M   YMTF
      P   MTX
                MTY
    
```

Таблица 8. Расшифровка значений функций при оптимизации по частотно-контрастной характеристике
 Table 8. Decoding of function values according to frequency-contrast characteristics optimization

Наименование функции	Расшифровка
M	Выполнение минимизации оценочной функции
TAR	Значение желаемого контраста
WT	Весовой коэффициент
ICOL	Номер длины волны. «M» — учитывает все заданные цвета; «P» — учитывает основной цвет
XMTF, YMTF	Указывает направление ЧКХ. X — сагиттальное; Y — меридиональное
MTX, MTY	Для общего использования рекомендуется применять среднее геометрическое значение ЧКХ для сагиттального и меридионального сечений
HBAR	Относительная высота на зрачке в меридиональном сечении
C/MM	Желаемое значение частоты, которая контролируется
GBAR	Относительная высота на зрачке в сагиттальном сечении

Таблица 9. Развитие схем объективов рыбий глаз
 Table 9. Development of fish-eye lens schemes

Номер схемы	Технические характеристики объектива						
	J	W , град.	F , мм	L	Q	S , мм	D
1	F2.0	130	3,17	видимый	дифракционно ограниченный	7,0	внутри
2	F2.0	180	2,5	видимый	геометрически ограниченный	7,0	внутри
3	F2.0	210	0,75	видимый	геометрически ограниченный	2,21	внутри

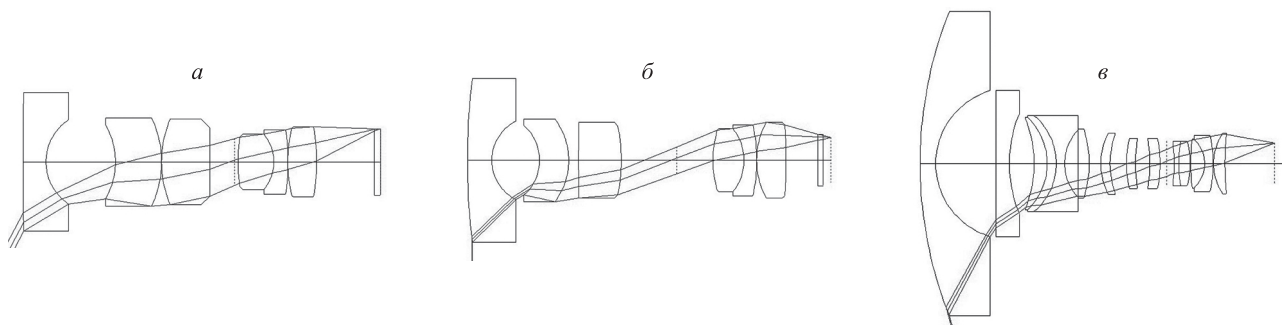


Рис. 6. Оптические схемы объектива рыбий глаз с угловыми полями: 130 градусов (а); 180 градусов (б) и 210 градусов (в)
 Fig. 6. Optical schemes of the fish-eye lens with angular fields: 130 degrees (a); 180 degrees (b) and 210 degrees (c)

Развитие схемных решений объективов рыбий глаз. Стратегия проектирования и управление процессом коррекции aberrаций были апробированы при расчете объективов рыбий глаз. Результаты исследования показали, что возможно увеличение углового поля и относительного отверстия этого объектива (табл. 9).

Многие изображающие ОС, такие как микрообъективы, объективы для литографии [20, 21] удобнее рассчитывать по частям. Применим этот же метод к расчету объектива рыбий глаз.

Объективы 1 и 2 можно представить составленными из двух частей — расположенной до апертурной диафрагмы насадки для увеличения поля объектива и объектива с вынесенным входным зрачком, методика расчета которого описана в [22].

Объектив 3 получен из работы [23] по методу проектирования «сверху-вниз» (рис. 6, в). Объектив имеет 13 линз (что отличается от рекомендации — максимум 6). Очевидно, что его возможно упростить. Это подтверждает факт, что метод «снизу-вверх» позволяет получить более простые ОС.

Заключение

В работе представлена реализация стратегии проектирования и управления процессом коррекции aberrаций объектива рыбий глаз, который востребован в научных исследованиях и народном хозяйстве. Наиболее удачной является совокупность методов проектирования, основанных на теории структурного и параметрического синтеза, обеспечивающая контроль разработчика за наличием необходимых коррекционных параметров в исходной оптической системе. При соблюдении этого

условия управление коррекцией остаточных aberrаций достигается за счет использования коррекционных возможностей схемы, которые были осознано заложены. В работе рассмотрены анализ свойств оптических изображающих систем, их классификация с последующим определением индекса сложности системы, классификация aberrаций и разработка методов их коррекции на основе различных стратегий проектирования. Важным элементом стратегии является композиция оценочной функции, которая управляет процессом автоматизированной коррекции aberrаций. Расчет допусков на изготовление при проектировании объектива рыбий глаз по методу «снизу-вверх» подтвердил, что конструкция, построенная изначально из элементов с известными свойствами, имеет меньшее количество оптических элементов и более свободные допуски на ее изготовление. При этом процедура принятия решения по выбору лучшего варианта оптической схемы основывается на получении данных о допусках на изготовление и может быть выполнена уже на этапе проектирования. В результате спроектирована схема объектива типа рыбий глаз, предложена блок-схема, определены параметры и коррекционные возможности. Выполнена автоматизированная коррекция на основе полученных рекомендаций. Рассчитаны допуски на изготовление, и определен уровень технологичности. Показаны возможности развития рассмотренной системы с целью расширения ее функциональных возможностей для увеличения углового поля до 210 градусов и апертурного числа до F2.0. Исследования содержат практический опыт и могут быть полезны при создании экспертных систем проектирования широкоугольных светосильных объективов, при обучении нейронных сетей.

Литература

1. Anitropova I.L. Simple method for computer-aided lens design with the elements of artificial intelligence // *Proceedings of SPIE*. 1992. V. 1780. P. 210–213. doi: 10.1117/12.142806
2. Livshits I.L., Vasilyev V.N. Q and A tutorial on optical design // *Advanced Optical Technologies*. 2013. V. 2. N 1. P. 31–39. doi: 10.1515/aot-2012-0077
3. Dilworth D.C. Automatic lens optimization: Recent improvements // *Proceedings of SPIE*. 1986. V. 554. P. 191–196. doi: 10.1117/12.949224
4. Dilworth D. *Lens Design. Automatic and quasi-autonomous computational methods and techniques*. IOP Publishitg Ltd, 2018. 400 p. doi: 10.1088/978-0-7503-1611-8

References

1. Anitropova I.L. Simple method for computer-aided lens design with the elements of artificial intelligence. *Proceedings of SPIE*, 1992, vol. 1780, pp. 210–213. doi: 10.1117/12.142806
2. Livshits I.L., Vasilyev V.N. Q and A tutorial on optical design. *Advanced Optical Technologies*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 31–39. doi: 10.1515/aot-2012-0077
3. Dilworth D.C. Automatic lens optimization: Recent improvements. *Proceedings of SPIE*, 1986, vol. 554, pp. 191–196. doi: 10.1117/12.949224
4. Dilworth D. *Lens Design. Automatic and quasi-autonomous computational methods and techniques*. IOP Publishitg Ltd, 2018, 400 p. doi: 10.1088/978-0-7503-1611-8

5. Васильев В.Н., Лившиц И.Л., Муромцев Д.И. Основы проектирования экспертных систем компоновки объективов. СПб.: Наука, 2012. 209 с.
6. Dilworth D.C., Shafer D. Man versus machine: A lens design challenge // *Proceedings of SPIE*. 2013. V. 8841. P. 88410G. doi: 10.1117/12.2022871
7. Русинов М.М. Техническая оптика. Л.: Машиностроение, 1979. 488 с.
8. Русинов М.М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.
9. Shafer D. Optical design and the relaxation response // *Proceedings of SPIE*. 1987. V. 766. P. 91–99. doi: 10.1117/12.940196
10. Livshits I.L., Hou Z., Van Grol P., Shao Y., Van Turnhout M., Urbach H.P., Bociort F. Using saddle points for challenging optical design tasks // *Proceedings of SPIE*. 2014. V. 9192. P. 919204. doi: 10.1117/12.2061975
11. Hou Z., Livshits I.L., Bociort F. One-dimensional searches for finding new lens design solutions efficiently // *Applied Optics*. 2016. V. 55. N 36. P. 10449–10456. doi: 10.1364/AO.55.010449
12. Livshits I.L., Glebovskiy A.S., Protsuto M.V., Volkova S.L. Interdisciplinary approach for simulation of starting points for optical and architectural design // *Advanced Optical Technologies*. 2019. V. 8. N 2. P. 135–144. doi: 10.1515/aot-2018-0062
13. Livshits I.L., Dilworth D.C. Trends in optical design from 1988 to 2018... where to from here? // *Advanced Optical Technologies*. 2018. V. 7. N 5. P. 335–341. doi: 10.1515/aot-2018-0025
14. Ezhova K.V., Zverev V.A., Tochilina T.V., Timoshuk I. Fundamentals of concentric lens systems synthesis // *Proceedings of SPIE*. 2016. V. 9947. P. 994719. doi: 10.1117/12.2237784
15. Zverev V.A., Tochilina T.V. Aberration analysis of a compensation scheme to monitor second-order concave reflecting surfaces // *Journal of Optical Technology*. 2017. V. 84. N 8. P. 536–541. doi: 10.1364/JOT.84.000536
16. Zverev V.A., Timoshuk I.N., Tochilina T.V. Method for designing an optical system for a three-mirror flat-field anastigmat // *Journal of Optical Technology*. 2017. V. 84. N 12. P. 838–842. doi: 10.1364/JOT.84.000838
17. Dilworth D.C. Improved convergence with the pseudo-second-derivative (PSD) optimization method // *Proceedings of SPIE*. 1983. V. 399. P. 159–165. doi: 10.1117/12.935427
18. Karow H. *Fabrication Methods for Precision Optics*. Wiley, 2004. 768 p.
19. Livshits I.L., Faehnle O. Producibility analysis of lens system during optical design stage // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2020. Т. 20. № 5. С. 625–633. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-625-633
20. Zorich N., Livshits I.L., Dilworth D., Okishev S.G. Design of an ultraviolet projection lens by using a global search algorithm and computer optimization // *Advanced Optical Technologies*. 2017. V. 6. N 1. P. 31–38. doi: 10.1515/aot-2016-0058
21. Livshits I.L., Zoric N. A concept of ultraviolet lithography system and design of its rear part using artificial intelligence for starting design // *Proc. 4th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology, PHOTOPTICS*. 2016. P. 84–88. doi: 10.5220/0005688500820086
22. Livshits I.L., Dilworth D.C. Practical tutorial: A simple strategy to start a pinhole lens design // *Advanced Optical Technologies*. 2015. V. 4. N 5-6. P. 413–427. doi: 10.1515/aot-2015-0024
23. Bliedner J., Gräfe G. *Optiktechnologie: Grundlagen–Verfahren–Anwendungen–Beispiele*. Hanser, 2010. 420 p. (in German)
5. Vasilev V.N., Livshits I.L., Muromtcev D.I. *Design Basics for Expert Lens Arrangement Systems*. St. Petersburg, Nauka Publ., 2012, 209 p. (in Russian)
6. Dilworth D.C., Shafer D. Man versus machine: A lens design challenge. *Proceedings of SPIE*, 2013, vol. 8841, pp. 88410G. doi: 10.1117/12.2022871
7. Rusinov M.M. *Optical Engineering*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979, 488 p. (in Russian)
8. Rusinov M.M. *Composition of Optical Systems*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989, 383 p. (in Russian)
9. Shafer D. Optical design and the relaxation response. *Proceedings of SPIE*, 1987, vol. 766, pp. 91–99. doi: 10.1117/12.940196
10. Livshits I.L., Hou Z., Van Grol P., Shao Y., Van Turnhout M., Urbach H.P., Bociort F. Using saddle points for challenging optical design tasks. *Proceedings of SPIE*, 2014, vol. 9192, pp. 919204. doi: 10.1117/12.2061975
11. Hou Z., Livshits I.L., Bociort F. One-dimensional searches for finding new lens design solutions efficiently. *Applied Optics*, 2016, vol. 55, no. 36, pp. 10449–10456. doi: 10.1364/AO.55.010449
12. Livshits I.L., Glebovskiy A.S., Protsuto M.V., Volkova S.L. Interdisciplinary approach for simulation of starting points for optical and architectural design. *Advanced Optical Technologies*, 2019, vol. 8, no. 2, pp. 135–144. doi: 10.1515/aot-2018-0062
13. Livshits I.L., Dilworth D.C. Trends in optical design from 1988 to 2018... where to from here? *Advanced Optical Technologies*, 2018, vol. 7, no. 5, pp. 335–341. doi: 10.1515/aot-2018-0025
14. Ezhova K.V., Zverev V.A., Tochilina T.V., Timoshuk I. Fundamentals of concentric lens systems synthesis. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9947, pp. 994719. doi: 10.1117/12.2237784
15. Zverev V.A., Tochilina T.V. Aberration analysis of a compensation scheme to monitor second-order concave reflecting surfaces. *Journal of Optical Technology*, 2017, vol. 84, no. 8, pp. 536–541. doi: 10.1364/JOT.84.000536
16. Zverev V.A., Timoshuk I.N., Tochilina T.V. Method for designing an optical system for a three-mirror flat-field anastigmat. *Journal of Optical Technology*, 2017, vol. 84, no. 12, pp. 838–842. doi: 10.1364/JOT.84.000838
17. Dilworth D.C. Improved convergence with the pseudo-second-derivative (PSD) optimization method. *Proceedings of SPIE*, 1983, vol. 399, pp. 159–165. doi: 10.1117/12.935427
18. Karow H. *Fabrication Methods for Precision Optics*. Wiley, 2004, 768 p.
19. Livshits I.L., Faehnle O. Producibility analysis of lens system during optical design stage. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 5, pp. 625–633. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-625-633
20. Zorich N., Livshits I.L., Dilworth D., Okishev S.G. Design of an ultraviolet projection lens by using a global search algorithm and computer optimization. *Advanced Optical Technologies*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 31–38. doi: 10.1515/aot-2016-0058
21. Livshits I.L., Zoric N. A concept of ultraviolet lithography system and design of its rear part using artificial intelligence for starting design. *Proc. 4th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology, PHOTOPTICS*, 2016, pp. 84–88. doi: 10.5220/0005688500820086
22. Livshits I.L., Dilworth D.C. Practical tutorial: A simple strategy to start a pinhole lens design. *Advanced Optical Technologies*, 2015, vol. 4, no. 5-6, pp. 413–427. doi: 10.1515/aot-2015-0024
23. Bliedner J., Gräfe G. *Optiktechnologie: Grundlagen–Verfahren–Anwendungen–Beispiele*. Hanser, 2010, 420 p. (in German)

Авторы

Лившиц Ирина Леонидовна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ecenter-optical10@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3256-1481>

Точили́на Татьяна Вячеславовна — кандидат технических наук, старший преподаватель, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, 6505787608_tvtochilina@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4173-8864>

Фаенле Оливер — PhD, старший эксперт по технологии производства оптики, PanDao GmbH, Санкт-Галлен, 9016, Швейцария, 6602727942_olifaehnle@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3090-7813>

Authors

Irina L. Livshits — PhD, Senior Researcher, Laboratory Head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ecenter-optical10@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3256-1481>

Tatiana V. Tochilina — PhD, Senior Lecturer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, 6505787608_tvtochilina@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4173-8864>

Oliver Faehnle — PhD, Senior Expert, PanDao GmbH, St. Gallen, 9016, Switzerland, 6602727942_olifaehnle@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3090-7813>

Волкова Светлана Леонидовна — кандидат педагогических наук, доцент кафедры иностранных языков, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация, [sc 57208204609](mailto:svetlanavolkova2008@yandex.ru), svetlanavolkova2008@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2192-9818>

Svetlana L. Volkova — PhD, Associate Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), Saint Petersburg, 190005, Russian Federation, [sc 57208204609](mailto:svetlanavolkova2008@yandex.ru), svetlanavolkova2008@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2192-9818>

Статья поступила в редакцию 07.12.2020
Одобрена после рецензирования 11.01.2021
Принята к печати 27.01.2021

Received 07.12.2020
Approved after reviewing 11.01.2021
Accepted 27.01.2021



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»