

## Расчет допусков объектива тепловизионной системы

© Н.Н. Кулакова, С.В. Мишин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Проектирование и создание оптических систем — это долгий, трудоемкий и всегда творческий процесс. На каждом этапе проектирования и расчета конструктор должен внимательно следить за тем, чтобы оптическая система полностью соответствовала всем предъявляемым к ней требованиям. Наличие погрешностей изготовления и сборки оптических систем ведет к возникновению дополнительных aberrаций и ухудшению качества изображения, что может привести к полной неработоспособности прибора. Именно поэтому расчет допусков на изготовление и сборку оптической системы является важной задачей при проектировании любого оптического прибора.*

*Настоящая работа посвящена разработке методики расчета допусков с помощью программы ZEMAX. Применение этой методики на примере расчета допусков объектива тепловизора позволило убедиться в том, что конструкция объектива является технологичной, имеет широкий диапазон допусков и обеспечивает требуемое качество изображения.*

*Описанная методика является универсальной и может быть применена для любых оптических систем с заданными критериями качества изображения.*

**Ключевые слова:** допуски, объектив, тепловизор, параметры.

В современном оптическом приборостроении широко распространены приборы, работающие в инфракрасной области спектра. Основным элементом оптических схем этих приборов является объектив, к качеству изображения которого предъявляют высокие требования. Эффективные методы расчета, применение средств автоматизированного проектирования, новые материалы и технологии позволяют разрабатывать оптические системы высокого качества. Однако их практическая реализация, трудоемкость изготовления и юстировки во многом зависят от теоретически обоснованных допусков на изготовление и сборку оптических деталей и компонентов. Особенно актуальна эта проблема для серийного и крупносерийного производства приборов [1].

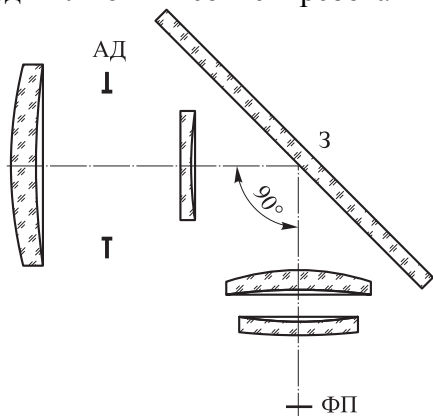


Схема объектива:

АД — апертурная диафрагма; З — зеркало сканирующее; ФП — фотоприемное устройство

Наличие погрешностей изготовления и сборки оптической системы приводит к возникновению дополнительных aberrаций, а следовательно, к ухудшению качества изображения. Поэтому при проектировании важен расчет допусков для изготовления и сборки оптических систем [2].

Внедрение современных программ расчета оптических систем позволяет автоматизировать решение ряда задач по расчету допусков. Это главным образом касается допусков радиусов кривизны поверхностей, толщин линз и воздушных промежутков, показателей преломления оптических материалов, децентрировки, а также некоторых вопросов анализа и синтеза допусков по различным параметрам при применении методов теории вероятностей и математической статистики [3].

Целью данной работы является расчет двухкомпонентного объектива, который входит в оптическую схему малогабаритного тепловизора, применяемого в инфракрасной области спектра ( $\lambda = 3...5$  мкм). Основные характеристики объектива (рисунок), предназначенного для работы с бесконечно удаленным предметом, приведены ниже:

Заднее фокусное расстояние $f'$ , мм .....	74
Угловое поле в пространстве предметов $2\omega$ , град .....	5
Относительное отверстие $1:K$ .....	1:1,7

Конструктивные параметры объектива приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Конструктивные параметры объектива

Радиус, мм	Толщина, мм	Показатель преломления	Материал	Световой диаметр, мм	Стрелки прогиба, мм
96,350	6,0	3,42530	Кремний 1А2 КЭФ 25/2,5–76	48,307	3,077
185,667	34,0	1,00000	Воздух	46,594	1,467
–939,476	3,0	4,02475	Германий ГМО–1–40	26,443	–0,093
144,037	50,0	1,00000	Воздух	26,083	0,592
58,394	5,0	3,42530	Кремний 1А2 КЭФ 25/2,5–76	34,218	2,563
175,204	7,5	1,00000	Воздух	32,980	0,778
–70,507	3,0	1,41099	Флюорит	28,117	–1,416
–120,772	24,8	1,00000	Воздух	28,386	–0,723

В плоскости изображения находится многоэлементное фотоприемное устройство, представляющее собой линейку фоторезисторов. В схеме объектива используется плоское зеркало для сканирования изображения по строке на фотоприемнике.

Согласно техническому заданию, в объективе установлен широко применяемый в портативной тепловизионной аппаратуре отечественный фотоприемник на основе селенида свинца ФУР129Л. Основные технические характеристики данного фотоприемника представлены ниже:

Количество элементов .....	64×1
Геометрический размер фоточувствительного элемента, мм .....	0,1×0,1
Диапазон спектральной чувствительности ( $\lambda_{\max}$ ), мкм .....	1,5...5,0 (3,7...4,1)
Вольтовая чувствительность, В/Вт .....	$1 \cdot 10^7$
Удельная обнаружительная способность, см · Гц <sup>1/2</sup> /Вт .....	$3 \cdot 10^{10}$
Постоянная времени, мкс .....	25
Рабочее напряжение, В .....	6
Коэффициент усиления предусилителей, % .....	200
Полоса пропускания предусилителей, Гц .....	30...15 000
Напряжение ТЭО, В .....	3
Ток ТЭО, А .....	0,9

Для обнаружения объектов с вероятностью не менее 50 % объектив должен формировать кружок рассеяния, который охватывает не менее двух чувствительных элементов фотоприемника. Поэтому диаметр кружка рассеяния должен быть 0,2 мм.

Для решения задачи расчета допусков следует установить зависимости между погрешностями изготовления оптических элементов схемы объектива и критерием качества, а именно кружком размытия. Эту задачу решаем с помощью программы автоматизированного расчета оптических систем ZEMAX.

Расчет допусков проводим в следующей последовательности.

1. Выбираем допуски из предлагаемого программой списка видов допусков. Для этого заходим в меню Editors (Редакторы) и выбираем редактор Tolerance Data Editor (Редактор допусков). В открывшемся окне редактора выбираем меню Tools (Инструменты). В следующем открывшемся окне выбираем Default Tolerances (Допуски по умолчанию). В результате выполненных операций появляется окно, содержащее виды допусков и их значения. Из предлагаемого списка убираем не представляющие для нас интерес допуски; для оставшихся допусков выбираем единицы измерения.

2. Устанавливаем желаемую величину допусков, если она не совпадает с величиной, предлагаемой программой по умолчанию. Для этого в окне с допусками вместо предлагаемых вводим значения допусков, которые может обеспечить изготовитель.

3. Исследуем чувствительность критерия качества на величину каждого допуска и выявляем наиболее сильно влияющие допуски. Для этого заходим в меню Tools (Инструменты), выбираем опцию Tolerancing (Допуски) и далее позицию Tolerancing (Допуски). В открывшемся окне выбираем Mode (Метод). С помощью этого контрольного окна выбираем режим анализа допусков Sensitivity (Анализ чувствительности). В окне Criteria (Критерий) задаем вид критерия RMS Spot Radius (Среднеквадратичное значение радиуса кружка размытия). В этом режиме вычисляют среднеквадратичные значения критерия качества изображения для каждой экстремальной величины каждого допуска в отдельности. После нажатия на клавишу Ok программа автоматически выдает значения допусков с соответствующими им значениями критерия качества изображения в миллиметрах. Программа также выдает список из 10 допусков, оказывающих наиболее сильное влияние на качество изображения.

4. Рассчитываем значения допусков по указанному в техническом задании значению критерия качества: это обратный способ расчета допусков. Снова заходим в меню Tools (Инструменты), выбираем опцию Tolerancing (Допуски) и далее еще раз Tolerancing (Допуски). В открывшемся окне выбираем Mode (Метод), в котором устанавливаем режим Inverse Limit (Обратный анализ допусков). В этом режиме вычисляются величины каждого допуска в отдельности для заданного значения критерия. Это значение критерия указывается в окне Limit (предел). В окне Criteria снова указываем тип критерия, а именно RMS Spot Radius. После нажатия на клавишу Ok программа автоматически выдает значения допусков: каждый допуск в отдельности обеспечивает заданное в окне Limit значение критерия качества изображения.

Полученные значения допусков будут автоматически использованы в качестве исходных данных для поиска вариантов конструкции объектива по методу Монте-Карло. В результате моделирования эффекта одновременного воздействия всех установленных допусков на критерий качества этим методом выдаются варианты систем с конструктивными параметрами, значения которых находятся в рассчитанных интервалах допусков.

5. Выполняем расчет оптических систем методом Монте-Карло. Для этого заходим в меню Tools, выбираем опцию Tolerancing и далее еще раз Tolerancing. В открывшемся окне выбираем Mode и устанавливаем в нем режим Skip Sensitivity (Отмена режима анализа чув-

ствительности допусков). Это обеспечит переход от режима чувствительности к методу Монте-Карло. В окне #Monte Carlo Runs (Количество пробегов) задаем число случайно генерируемых методом Монте-Карло схем, например 1000. Как отмечалось выше, значения допусков для генерируемых систем автоматически выбираются из результатов расчета в Inverse Limit.

Переходим к окну Save MC Runs (Запись пробегов), которое используют для задания числа случайно генерируемых схем, сохраняемых в памяти. Файлы с конструктивными параметрами этих схем будут записаны под именами MC\_T0001.zmx, MC\_T0002.zmx и т. д. вплоть до заданного выше в Save MC Runs числа. Анализ полученных файлов позволяет детально изучать процесс моделирования допусков. После нажатия на клавишу Ok программа приступит к расчету, по завершении которого появляется окно с результатами расчета критерия качества изображения для количества систем, указанного в окне #Monte Carlo Runs. Результаты расчета приводятся в виде таблицы, состоящей из трех столбцов: первый столбец содержит номер сгенерированной схемы, второй — значение критерия качества, третий столбец — отклонение рассчитанного значения критерия качества от значения в исходной системе.

6. Выполняем процедуры анализа оптических систем, предложенных методом Монте-Карло. Если в результате расчета хотя бы в одной из сгенерированных схем имеет место отклонение от назначенного среднеквадратичного значения критерия качества, то необходимо вернуться к исследованию критерия чувствительности (п. 3), сузить значения десяти допусков, представленных в списке этого пункта, оставить наиболее влиятельные допуски и повторить расчет методом Монте-Карло. Если окажется, что требуются слишком жесткие в технологическом отношении допуски, то следует изменить принципиальную схему объектива.

На всех этапах расчета начальные и окончательные значения допусков всегда находятся в таблице Tolerance Data Editor.

*Пример расчета допусков* по предлагаемой методике приведем для объектива, конструктивные параметры которого были приведены выше. Исходя из технического задания на объектив, критерием качества является среднеквадратичный радиус кружка рассеяния, равный 0,1 мм.

1. Из списка, предлагаемого программой, выбираем следующие виды допусков (в скобках указаны принятые в программе сокращенные обозначения):

- допуски на радиусы кривизны сферических поверхностей (TFRN);

- допуски на толщины линз и воздушных промежутков (ТТН);
- допуски на смещение поверхностей линз в поперечном направлении к оси (TSDX, TSDY);
- допуски на смещение в поперечном направлении к оси каждого элемента в целом (TEDX, TEDY);
- допуск на поворот линз в оправе относительно вершины первой поверхности — допуск на наклон линз в оправе относительно осей  $X$  и  $Y$  (TETX, TETY).

2. Устанавливаем величины допусков в соответствии с технологическими возможностями изготовления объектива:

Допуски на радиусы кривизны сферических поверхностей (для $\lambda = 0,6328$ мкм).....	5 колец Ньютона
Допуски на толщины воздушных промежутков, мм .....	$\pm 1$
Допуски на толщины линз, мм .....	$\pm 0,3$
Допуски на смещение поверхностей линз в поперечном направлении к оси, мм .....	$\pm 0,1$
Допуски на смещение в поперечном направлении к оси каждого элемента в целом, мм .....	$\pm 0,1$
Допуск на наклон линз в оправе относительно осей $X$ и $Y$ , угл. мин .....	$\pm 10$

3. Определяем 10 наиболее влиятельных допусков. Для данного объектива выбираем следующие допуски (номера поверхностей указаны согласно табл. 1.):

- допуск на толщину воздушного промежутка между поверхностями 2 и 3; 4 и 5; 6 и 7;
- допуск на толщину между поверхностями 3 и 4; 5 и 6; 7 и 8;
- допуск на наклон линзы с поверхностями 1 и 2;
- допуск на поворот линзы с поверхностями 3 и 4; 5 и 6; 7 и 8.

4. Применяем обратный способ расчета допусков. Для установленного критерия качества (среднеквадратичный радиус кружка рассеяния, равный 0,1 мм) вычисляем значения допусков, обеспечивающие это значение критерия качества. Результаты получаем в виде таблицы, состоящей из четырех столбцов. В первом столбце указан номер допуска, во втором — название допуска, в третьем — минимальное значение допуска, в четвертом — максимальное значение допуска.

Для исследуемого объектива в эту таблицу включены 50 допусков, т. е. в ней будет 50 строк. Данная таблица в статье не приводится.

5. Проводим расчет оптических систем методом Монте-Карло с допусками, вычисленными в п. 4. Для этого выбираем число генерируемых оптических схем (количество пробегов), равное 1 000.

6. Для каждой схемы получены значения критерия качества и отклонения его от исходного значения. Поскольку таблица с результа-

тами расчета методом Монте-Карло состоит из 1000 строк, поэтому ввиду ее размера здесь не приводим. Проанализировав табличные данные, видим, что для ряда систем критерий качества вышел за пределы значения, указанного в техническом задании, а именно 0,1 мм. В соответствии с методикой необходимо вернуться к п. 3, т. е. сузить наиболее влиятельные допуски. Значения этих допусков после ужесточения приведены в табл. 2.

Повторяем расчет методом Монте-Карло, в результате которого снова получаем 1000 оптических схем. В данном случае все системы имеют критерий качества, не выходящий за установленное значение 0,1 мм.

Таблица 2

**Значения наиболее влиятельных допусков после ужесточения**

Название допуска	Значение
Допуск на толщину воздушного промежутка между поверхностями 2 и 3, 4 и 5, 6 и 7, мм	±0,5
Допуск на толщину между поверхностями 3 и 4, 5 и 6, 7 и 8, мм	±0,2
Допуск на наклон линзы с поверхностями 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6, угл. мин	±3

Поскольку в данной системе в общей сложности рассматривается 50 допусков, то из технологических соображений всем им присвоены значения, которые имеют наиболее влиятельные допуски, приведенные в табл. 2. Установленные из этих соображений допуски будут с запасом обеспечивать требуемый критерий качества изображения.

Итак, в результате изложенного выше исследования рассчитаны значения допусков на конструктивные параметры рассмотренного объектива:

Допуск на радиусы кривизны поверхностей линз (при $\lambda = 0,6328$ мкм) .....	5 колец Ньютона
Допуск на толщины, мм:	
линз .....	±0,2
воздушных промежутков .....	±0,5
Допуск на децентрировку, мм:	
поверхностей в линзах .....	±0,1
линз в оправках .....	±0,1
Допуск на наклон линз в оправках, угл. мин .....	±3

Как показали расчеты, допуски имеют широкий диапазон значений вследствие чего конструкция объектива является технологичной. Это означает, что изготовление объектива не вызовет затруднений. Объектив, изготовленный с указанными допусками, обеспечит требуемое качество изображения с высокой надежностью.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сокольский М.М. *Допуски и качество оптического изображения*. Ленинград, Машиностроение, 1989, 221 с.
- [2] Мальцев М.Д. *Расчет допусков на оптические детали*. Москва, Машиностроение, 1974, 168 с.
- [3] Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А. и др. *Справочник технолога-оптика*. 2-е изд., перераб. и доп. Санкт-Петербург, Политехника, 2004, 679 с.

Статья поступила в редакцию 24.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кулакова Н.Н., Мишин С.В. Расчет допусков объектива тепловизионной системы. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/831.html>

**Кулакова Надежда Николаевна** родилась в 1956 г., окончила МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1979 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области расчета оптических систем оптико-электронных приборов. e-mail: [nnkulakova@gmail.com](mailto:nkulakova@gmail.com)

**Мишин Святослав Валерьевич** родился в 1991 г., поступил в МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2008 г. Научно-исследовательской работой занимается под руководством Кулаковой Н.Н., канд. техн. наук, доцента кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Тематика научно-исследовательской работы — расчет допусков объектива тепловизионной системы. e-mail: [SvyatoslawMishin@yandex.ru](mailto:SvyatoslawMishin@yandex.ru)