

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ГОРЯЧЕВА ВАРВАРА АЛЕКСАНДРОВНА

**Объектив с переменным фокусным расстоянием для телевизионной  
камеры обзорно-поисковой информационно-измерительной системы**

**Специальность 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие  
системы**

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
к. т. н. Погорельский С.Л.

г. Тула, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТИВОВ С ПЕРЕМЕННЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ .....	12
1.1 Двухканальная телевизионная обзорно-поисковая информационно-измерительная система .....	12
1.2 Автоматизированное проектирование оптических систем .....	18
1.3 Объективы с переменным фокусным расстоянием.....	21
1.4 Автоматизированное проектирование оптических систем зарубежными разработчиками (на примере фирмы <i>Canon</i> ) .....	32
1.5 Методы синтеза объективов переменного фокусного расстояния .....	37
Выводы по главе 1.....	42
ГЛАВА 2 ВЫБОР МЕТОДА РАСЧЕТА ИСХОДНОЙ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТИВА С ПЕРЕМЕННЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ.....	43
2.1 Математическая модель оптической системы с переменным фокусным расстоянием.....	43
2.2 Нахождение переменных математической модели оптической системы с переменным фокусным расстоянием методом вариации параметров.....	48
2.3 Оптическая система, полученная методом вариации параметров. Методика расчета объектива с переменным фокусным расстоянием.....	61
Выводы по главе 2.....	68
ГЛАВА 3 ОБЪЕКТИВ С ПЕРЕМЕННЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ ДЛЯ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ КАМЕРЫ ОПИИС.....	69

3.1	Восьмикратный объектив переменного фокусного расстояния с одним отрицательным компонентом .....	71
3.2	Восьмикратный объектив переменного фокусного расстояния с двумя отрицательными компонентами .....	79
3.3	Четырехкомпонентный двадцатикратный объектив переменного фокусного расстояния.....	87
3.4	Шестикомпонентный двадцатикратный объектив переменного фокусного расстояния.....	96
	Выводы по главе 3.....	107
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	111
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	115
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	121
	Приложение А .....	121
	Приложение Б.....	122

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

МПА – метод полиномиальной аппроксимации

ОПИИС – обзорно-поисковая информационно-измерительная система

ОПФР – объектив с переменным фокусным расстоянием

ОС – оптическая система

ОСПФР – оптическая система переменного фокусного расстояния

ОЭС – оптико-электронная система

ТВ-канал – телевизионный канал

ФПУ – фотоприемное устройство

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время обзорно-поисковые информационно-измерительные системы (ОПИИС) содержат канал технического зрения, что позволяет широко использовать их в различных отраслях – в геодезии и картографии, кинематографии, инфраструктуре, общественной безопасности, транспорте и т.д. В зависимости от выполняемой задачи ОПИИС оснащается соответствующим оптическим блоком. Для выполнения комплекса задач, необходимо, чтобы оптический блок обладал как большим полем зрения, так и достаточным увеличением, для чего используются многоканальные системы. Однако использование многоканальных систем не всегда позволяет выполнить требования к габаритам и массе, а также стоимости ОПИИС. Альтернативной заменой служит телевизионная система с объективом переменного фокусного расстояния, обеспечивающая требования, предъявляемые к ОПИИС.

В настоящее время проектирование объектива с переменным фокусным расстоянием является актуальной научной и практической задачей, поскольку единых методов проектирования не существует. Однако имеются основные этапы проектирования, присущие любой оптической системе – синтез, анализ и оптимизация. Как отмечается в некоторых работах, именно этап синтеза исходной оптической системы является определяющим при проектировании оптических систем, в частности объектива с переменным фокусным расстоянием. Этап синтеза, как правило, начинается с расчета системы в параксиальной области, для которой определяются габариты и оптические силы ее компонентов.

Анализ литературных источников свидетельствует, что существуют несколько подходов к нахождению начальной оптической системы на этапе синтеза. К одному из существующих подходов следует отнести методы, основанные на поиске наиболее соответствующего аналога и его дальнейшей оптимизации. Метод позволяет исключить начальный этап расчета системы в

параксиальной области. Однако, при проектировании новой системы, в некоторых случаях возможно не получить удовлетворительного результата. [1, 25]

Другой подход основан на применении методов нелинейного программирования, для этого требуется некоторая стартовая система, которая во многих случаях отсутствует либо требует трудоемкого патентного поиска.

К третьей группе можно отнести методы, основанные на разработке специализированных алгоритмов, учитывающих специфику решаемых задач. Однако эти методы не могут применяться в решении других задач. [2, 24]

Таким образом, актуальной научной и практической задачей является габаритный синтез объективов с переменным фокусным расстоянием, т.е. нахождение исходной оптической системы при минимальных начальных данных. Метод, позволяющий решить данную проблему, желательно автоматизировать на базе программы, в которой будет осуществляться дальнейший расчет оптической системы.

**Цель и задачи.** Целью диссертационной работы является повышение функциональных характеристик обзорно-поисковой информационно-измерительной системы за счет применения телевизионной камеры с объективом переменного фокусного расстояния, обеспечивающим высокое качество изображения.

Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:

- ✓ проанализирована двухканальная телевизионная ОПИИС, состоящая из разработанного и запатентованного объектива для ближней ИК-области спектра (патент РФ 2690098) и разработанного термостабилизированного объектива видимой и ближней ИК-области спектра. Выявлены достоинства и недостатки двухканальной ОПИИС, предложена одноканальная ОПИИС с объективом переменного фокусного расстояния;
- ✓ выполнены обзор и анализ существующих объективов с переменным фокусным расстоянием;

- ✓ проанализированы существующие методы синтеза оптических систем с переменным фокусным расстоянием;
- ✓ разработана математическая модель, описывающая трех- и четырехкомпонентную оптическую систему переменного фокусного расстояния в параксиальной области, с учетом ограничений, применяемых к этой системе, и решаемая методом вариации параметров;
- ✓ разработан алгоритм и реализована программа синтеза исходной трех- и четырехкомпонентной оптической системы с переменным фокусным расстоянием;
- ✓ разработана методика расчета  $n$ -компонентной оптической системы с переменным фокусным расстоянием;
- ✓ проведена верификация разработанной методики расчета на примере объективов с переменным фокусным расстоянием для телевизионной камеры ОПИИС.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является объектив переменного фокусного расстояния с высоким качеством формируемого им изображения для телевизионной камеры ОПИИС.

Предметом исследования является методика расчета объективов с переменным фокусным расстоянием телевизионной камеры из состава ОПИИС.

#### **Научная новизна работы.**

1. Разработана математическая модель, описывающая трех- и четырехкомпонентную оптическую систему переменного фокусного расстояния в параксиальной области, отличающаяся от известных накладываемыми ограничениями на оптическую силу третьего компонента и световой диаметр первого компонента, позволяющая синтезировать исходные данные для проектирования ОПИИС.

2. Разработан алгоритм синтеза исходной оптической системы трех- и четырехкомпонентного объектива с переменным фокусным расстоянием в параксиальной области, отличающийся от известных применением метода вариации параметров, и позволяющий автоматизировать процесс расчета

оптических сил, относительных отверстий и законов перемещения компонентов объектива ОПИИС.

3. Предложена методика расчета  $n$ -компонентного объектива с переменным фокусным расстоянием, отличающаяся от известных автоматизацией этапа синтеза исходной оптической системы объективов с переменным фокусным расстоянием, позволяющая повысить функциональные характеристики ОПИИС.

**Теоретическая значимость работы:** метод структурно-габаритного синтеза объективов с переменным фокусным расстоянием, для телевизионной камеры ОПИИС, дополняет теорию и расчет оптических систем.

**Практическая значимость работы:** предложенный алгоритм синтеза оптической системы трех- и четырехкомпонентного объектива с переменным фокусным расстоянием ОПИИС, в основу которого положен метод вариации параметров, позволяет решить проблему выбора оптической схемы на этапе ее синтеза. Реализация предложенного алгоритма в программе расчета оптических систем позволяет существенно сократить время габаритного синтеза такой системы. Удобство предложенной программы расчета заключается в ее наглядности, поскольку разработчик самостоятельно задает закон движения компонентов и сразу получает результаты расчета. В результате применения методики, в основу которой положена предлагаемая программа расчета, получен объектив переменного фокусного расстояния телевизионной камеры высокого разрешения ОПИИС.

**Методы исследования.** В данной работе использованы аналитические методы, основанные на применении теории параксиальной оптики, численные методы, компьютерное программирование, компьютерное моделирование и оптимизация оптических систем с переменным фокусным расстоянием.

**Степень разработанности темы исследования.** По данной теме существует достаточное количество работ как в России, так и за рубежом. Разработкой объективов с переменным фокусным расстоянием занимаются следующие фирмы и организации ПАО «Красногорский завод имени С. А.



Зверева» (г. Красногорск, Россия), АО «ЛОМО» (г. Санкт-Петербург, Россия), ОАО «Ростовский оптико-механический завод» (г. Ростов, Россия), ОАО «Пеленг» (Беларусь), «Sony» (Япония), «Fujifilm» (Япония), «Nikon» (Япония), «Canon» (Япония) и др. Однако в настоящее время актуальной задачей остается поиск общих методов расчета оптических систем с переменным фокусным расстоянием.

Теоретические предпосылки к разработке таких систем были созданы трудами отечественных и зарубежных ученых: Пахомов И.И., Русинов М.М., Волосов Д.С., Шпякин М.Г., M.J. Kidger, M. Laikin и др.

**Личный вклад автора** определяется общей формулировкой и обоснованием целей и задач исследований, выбором методов их решения, разработкой методики синтеза исходной оптической системы на примере трех- и четырехкомпонентного объектива с переменным фокусным расстоянием в параксиальной области, в основу которой положен метод вариации параметров, реализованный в программе расчета оптических систем; разработкой примерной методики расчета объектива с переменным фокусным расстоянием.

**Достоверность результатов** и выводов диссертационной работы подтверждена моделированием в программном пакете по расчету оптических систем. Результаты работы внедрены на АО «Конструкторское бюро приборостроения им. Академика А.Г. Шипунова» в отделе расчета и конструирования оптических систем. Получен патент на изобретение 2690098 РФ Объектив для ближней ИК-области спектра.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Математическая модель, описывающая трех- и четырехкомпонентную оптическую систему переменного фокусного расстояния в параксиальной области, учитывающая ограничения, применяемые к этой системе, искомые переменные которой находятся методом вариации параметров.

2. Алгоритм синтеза исходной оптической системы трех- и четырехкомпонентного объектива с переменным фокусным расстоянием в

параксиальной области, реализованный в программе по расчету оптических систем, в основу которого положен метод вариации параметров.

3. Методика расчета  $n$ -компонентного объектива с переменным фокусным расстоянием, в основу которой положена разработанная программа синтеза исходной оптической системы такого объектива, что повышает функциональные характеристики ОПИИС.

4. Верификация разработанной методики расчета на примере объективов с переменным фокусным расстоянием для телевизионной камеры ОПИИС.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования (п.6 «Исследование возможностей и путей совершенствования и создания новых элементов, частей, образцов информационно-измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, а также разработка новых принципов построения и технических решений») специальности 2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Результаты работы были представлены на следующих конференциях: Всероссийская научно-техническая конференция «Системы управления движением и навигация. Современное состояние и перспективы», 2017; Всероссийская научно-техническая конференция «Информационно-измерительные системы комплексов навигации и управления движением», 2019; 15 Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2022», 2022.

Результаты работы отражены в 5 печатных работах, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, 1 работа в сборнике трудов международной и 1 работа в сборнике трудов всероссийской научно-технических конференциях, 1 патент на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, приложений. Диссертация изложена на 122 страницах машинописного текста, включая 51 рисунок, 9 таблиц,

63 наименование используемых источников. Отдельные выводы даны в конце каждого раздела, основные теоретические и практические результаты – в заключении диссертации. Достоверность результатов исследования подтверждена моделированием в программном пакете по расчету оптических систем.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы и сформулирована цель и задачи диссертационной работы, научная новизна и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрена двухканальная оптическая система, ее достоинства и недостатки, предложена одноканальная ОПИИС с объективом переменного фокусного расстояния. Показаны проблемы проектирования ОПИИС с объективом переменного фокусного расстояния, изложены методы проектирования и рассмотрены некоторые существующие системы.

**Во второй главе** предложена математическая модель, описывающая объектив с переменным фокусным расстоянием в параксиальной области, и выбран метод нахождения ее искомым переменных, который был реализован в программе по расчету оптических систем. Предложена методика расчета объектива с переменным фокусным расстоянием.

**В третьей главе** представлены четыре варианта разработанных объективов для телевизионной камеры высокой четкости ОПИИС, их достоинства и недостатки. Был сделан вывод, что любой из этих объективов может быть использован для такой камеры.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

## ГЛАВА 1 МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТИВОВ С ПЕРЕМЕННЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ

### 1.1 Двухканальная телевизионная обзорно-поисковая информационно-измерительная система

В настоящее время наблюдается быстрое развитие обзорно-поисковых информационно-измерительных систем, которые широко используются в местах повышенной опасности и сложности, в гражданской и коммерческой сферах, в частности, для охраны и мониторинга объектов, ликвидации чрезвычайных ситуаций, в поисково-спасательных работах, картографировании и т.д. Таким образом, обзорно-поисковая информационно-измерительная система должна быть оснащена соответствующей оптической системой, предназначенной для выполнения той или иной задачи (рисунок 1.1).

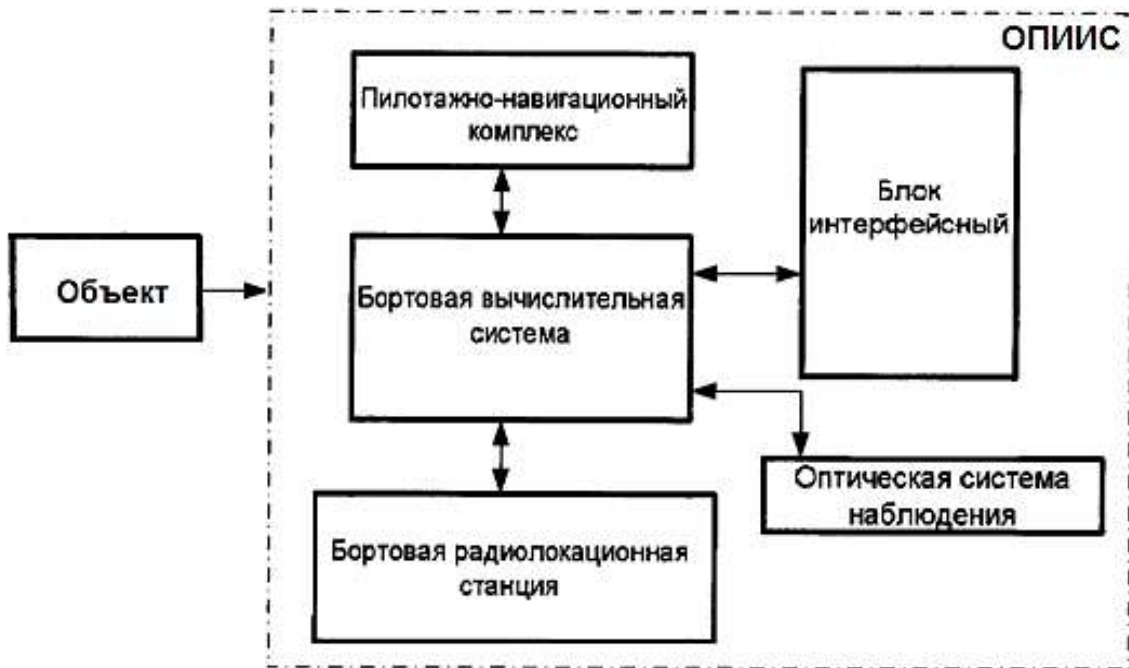


Рисунок 1.1 – Структурная схема ОПИИС

Оптическая система ОПИИС должна удовлетворять соответствующим требованиям, в частности обнаружение объекта в зоне наблюдения и распознавание типа объекта и идентификации. Для этих целей в последнее время используют многоканальные системы, которые расширяют возможности и повышают эффективность функционирования оптико-электронных систем

(ОЭС) в различных условиях. Многоканальные системы содержат также ТВ-каналы различного поля зрения и тепловизионные каналы.

Предлагается использовать двухканальную телевизионную оптическую систему наблюдения, включающую разработанный и запатентованный нами объектив для ближней ИК-области спектра (патент РФ 2690098) [3] фиксированного фокусного расстояния и разработанный термостабилизированный объектив видимой и ближней ИК-области спектра [4] фиксированного фокусного расстояния.

Объектив для ближней ИК-области спектра обеспечивает выполнение предъявляемых требований к телевизионной камере ОПИИС, и имеет следующие характеристики:  $f'=180$  мм, угловое поле  $2\omega=3,6^\circ$ , относительное отверстие  $D/f'=1:3,6$ ,  $\lambda=0,600\dots0,800$  мкм. Объектив термостабилизирован в диапазоне температур от минус  $40^\circ\text{C}$  до  $+60^\circ\text{C}$  (рис.1.2), содержит последовательно расположенные на оптической оси апертурную диафрагму и три компонента. Первый компонент – положительный мениск 1, обращенный выпуклостью к предмету, склеенный из двояковыпуклой и двояковогнутой линз. Второй компонент – положительный мениск 2, обращенный выпуклостью к предмету, склеенный из двояковыпуклой и двояковогнутой линз. Третий – отрицательный мениск 3, обращенный выпуклостью к изображению и выполненный из стекла с малым значением показателя дисперсии и с малым значением температурного коэффициента показателя преломления. При этом фокусные расстояния компонентов и расстояние между вторым и третьим компонентами удовлетворяют следующим условиям:  $F_1/F_2=1,0\div5,0$ ;  $F_2/F_0=0,6\div1,8$ ;  $F_3/|F_0|=0,7\div1,4$ ;  $L_{23}/F_0=0,2\div0,5$ ; где  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_0$  – фокусные расстояния первого, второго, третьего компонентов и объектива соответственно;  $L_{23}$  – расстояние между вторым и третьим компонентами. Объектив также содержит склеенную призму-куб 5, которая пропускает излучение в спектральном диапазоне длин волн от 600 нм до 900 нм и отражает излучения длиной волны 1064 нм или 1540 нм, и два клина 6 и 7, светофильтр 8. Клинья 6 и 7 установлены с возможностью поворота вокруг

оптической оси и используются для юстировки фотоприемного устройства. Светофильтр 8 ослабляет излучение с длиной волны 1064 нм или 1540 нм и служит для защиты фотоприемного устройства (ФПУ).

Представленная конструкция позволяет минимизировать длину объектива, повысить качество изображения (рис. 1.3) и расширить диапазон рабочих температур объектива.

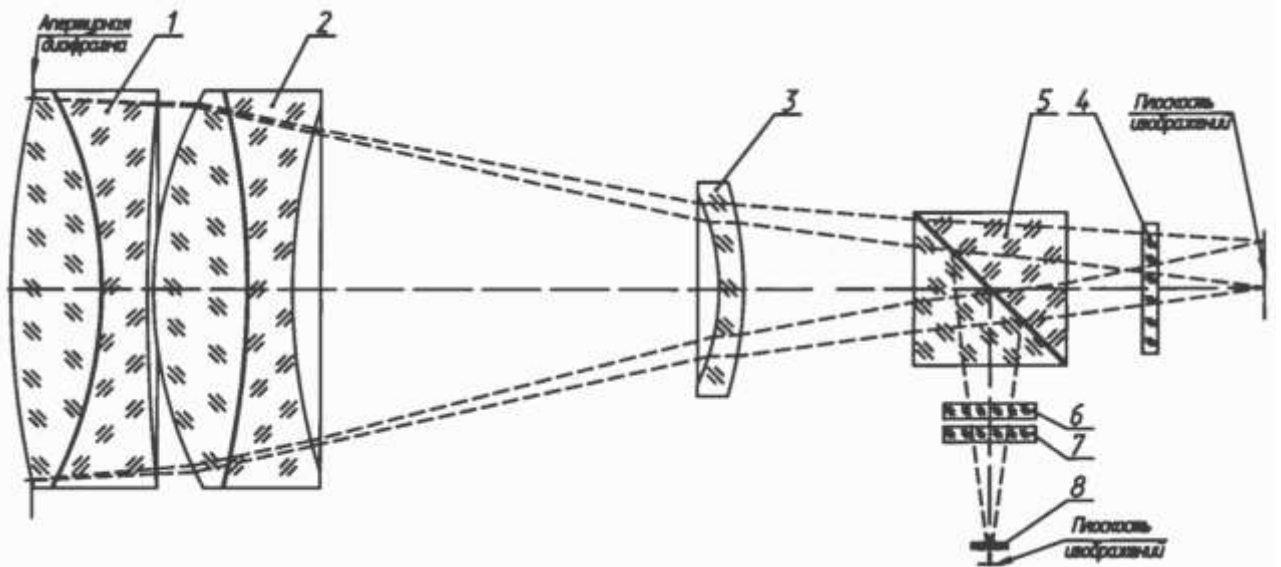


Рисунок 1.2 – Объектив ближней ИК-области спектра

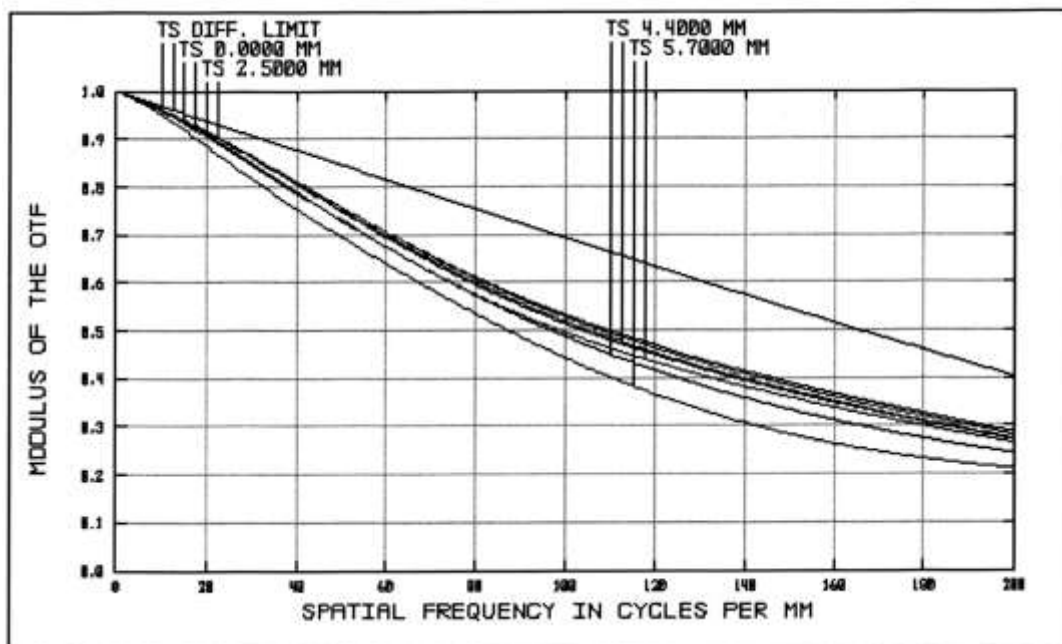


Рисунок 1.3 – Частотно-контрастная характеристика объектива ближней ИК-области спектра

Термостабилизированный объектив видимой и ближней ИК-области спектра также обеспечивает выполнение предъявляемых требований к телевизионной камере ОПИИС, и имеет следующие характеристики:  $f'=75$  мм, угловое поле  $2\omega=6^\circ$ , относительное отверстие  $D/f'=1:4,1$ ,  $\lambda=0,400\dots0,850$  мкм. Объектив (рис.1.4) термостабилизирован в диапазоне температур от минус  $50^\circ\text{C}$  до  $+60^\circ\text{C}$ , и содержит пять компонентов. Первый компонент – отрицательный мениск, обращенный выпуклостью к предмету, склеенный из двояковыпуклой и двояковогнутой линз. Второй компонент – положительная линза, обращенная выпуклостью к предмету, склеенный из отрицательного мениска и двояковыпуклой линзы. Третий – отрицательный мениск, обращенный выпуклостью к предмету, склеенный из двояковыпуклой и двояковогнутой линз. Четвертый компонент – двояковыпуклая линза, обращенная поверхностью с крутым радиусом кривизны к предмету и выполненная из стекла с малым значением показателя дисперсии и с малым значением температурного коэффициента показателя преломления. Пятый – отрицательный мениск, обращенный выпуклостью к предмету, склеенный из двояковыпуклой и двояковогнутой линз.

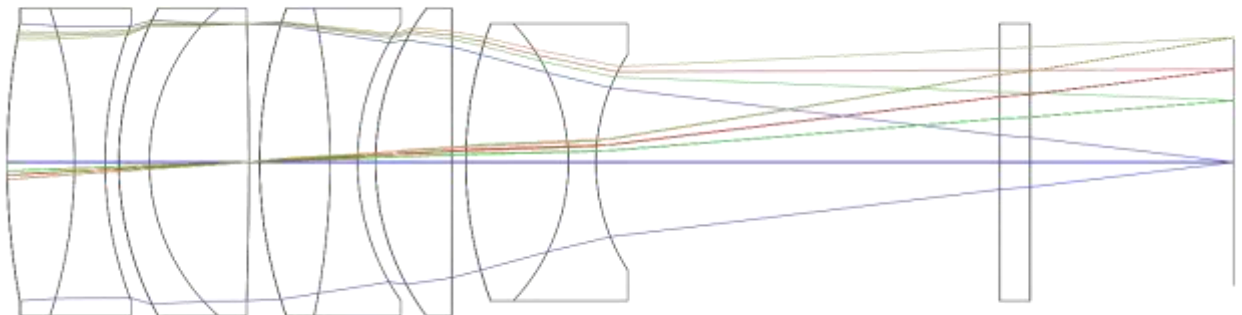


Рисунок 1.4 – Термостабилизированный объектив видимой и ближней ИК-области спектра

Хроматизм положения для зонального луча ( $P_y=0,95$ ) исправлен для трех длин волн. Дисторсия составляет 1,25%. Уровень доли энергии излучения, попадающего на элемент матрицы, лежит выше 0,75 для осевого пучка. На

частоте Найквиста объектив имеет контраст выше 0,6 отн. ед. (рис. 1.5) Среднеквадратическое отклонение волнового фронта – около 0,058 отн.ед., из чего следует, что система имеет дифракционное качество.

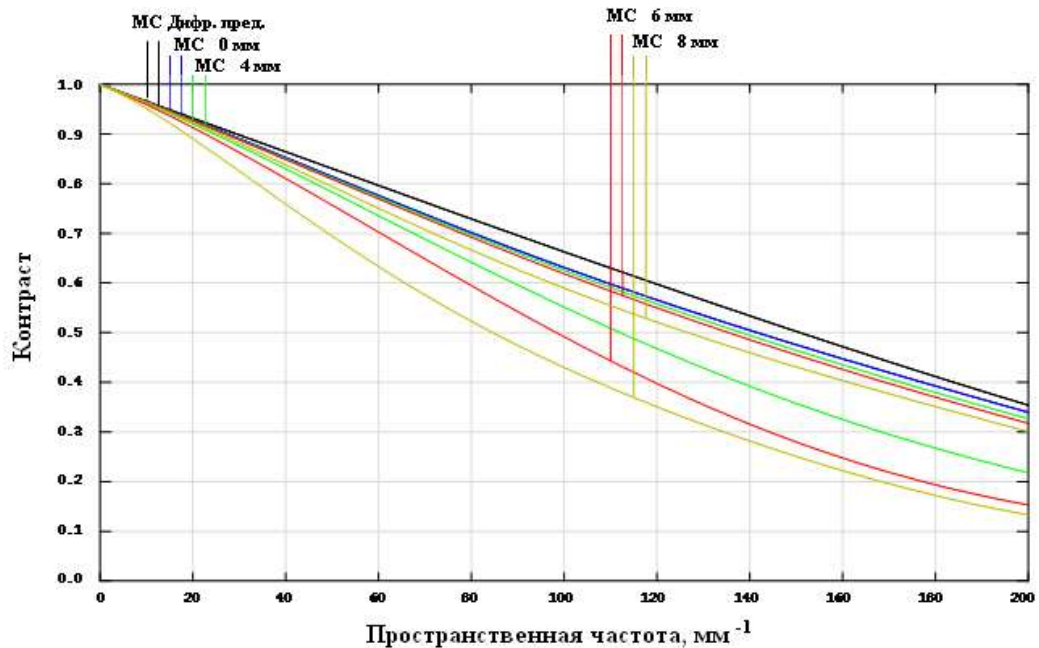


Рисунок 1.5 – Частотно-контрастная характеристика термостабилизированного объектива видимой и ближней ИК-области спектра

Функциональные характеристики ОПИИС с двумя предлагаемыми ТВ-каналами представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Функциональные характеристики двухканальной ОПИИС

Наименование характеристик	ТВ-канал (патент 2690098 РФ)	ТВ-канал (Термостабилизированный объектив)
	Значения	
Область длин волн, мкм	0,6...0,8	0,4...0,85
Угловое поле, град	3,6	6
Фокусное расстояние, мм	180	75
Относительное отверстие, отн. ед.	1:3,6	1:4,1
Дальность обнаружения предмета (при $P \geq 0,9$ ), км	9,5	4,8
Дальность опознавания предмета (при $P \geq 0,9$ ), км	3,1	1,4
Дальность идентификации предмета (при $P \geq 0,9$ ), км	2,1	0,8



Таким образом, двухканальная телевизионная ОПИИС имеет хорошие функциональные характеристики, что позволяет эффективно решать задачи по обнаружению, опознаванию и идентификации предмета даже в сумеречное время суток, кроме того, одним из основных достоинств двухканальной системы является возможность независимой настройки, юстировки и диагностики каждого канала. К недостаткам можно отнести сложность совмещения оптических осей отдельных каналов. Совмещение осей требует высоких точностей при изготовлении и юстировке, поэтому часто прибегают к программному совмещению изображений на матрицах. Кроме того необходимо обеспечить требования к габаритам и массе, а также стоимости ОПИИС, что не всегда возможно выполнить. [5, 33, 34, 39]

Решить данную проблему возможно заменив двухканальную телевизионную систему одноканальной. При этом можно улучшить функциональные характеристики ОПИИС, за счет расширения характеристик оптической системы. Таким образом, для расширения возможностей ОПИИС, в частности выполнения комплекса задач, необходимо, чтобы оптическая система (ОС) обладала как большим полем зрения, так и достаточным увеличением. Выполнить данные требования возможно, применяя телевизионную систему с объективом переменного фокусного расстояния (ОПФР).

Панкратический объектив – это объектив с переменным фокусным расстоянием, позволяющий плавно изменять увеличение, сохраняя требуемое качество изображения во всем диапазоне изменения фокусных расстояний. Обладает как большим полем зрения при малых фокусных расстояниях, так и большим увеличением при больших фокусных расстояниях. Наблюдение с помощью такого объектива осуществляется непрерывно, при необходимости более детального рассмотрения просматриваемой области. Однако существуют проблемы при проектировании объективов переменного фокусного расстояния, поскольку не существует единых методов проектирования, при этом с каждым

годом требования к параметрам объективов переменного фокусного расстояния ужесточаются:

- увеличивается уровень кратности изменения фокусных расстояний;
- возрастает светосила объективов как за счет увеличения относительного отверстия, так и за счет повышения коэффициента пропускания;
- уменьшается значение ближайшей дистанции съемки (объективы с «макрозумом» позволяют осуществлять съемку объективов, расположенных вплотную к оправе объектива);
- уменьшаются габариты и вес объективов;
- повышается качество изображения.

Таким образом, проектирование объективов переменного фокусного расстояния остается сложной научной и практической задачей, при этом использование телевизионной системы с объективом переменного фокусного расстояния позволит повысить функциональные возможности ОПИИС.

## 1.2 Автоматизированное проектирование оптических систем

В настоящее время существуют следующие методы расчета оптических систем [5]:

- метод проб (выбор аналога) – требуется исходная система, при работе с которой расчетчик должен обладать интуицией и опытом для получения желаемого результата, расчёт может занимать много времени, что может не оправдаться;
- алгебраический метод расчета – применяется теория аберраций третьего порядка, при больших значениях относительного отверстия и углового поля точность расчета уменьшается, вследствие увеличения влияния аберраций высших порядков [6];
- метод композиции оптических систем, разработанный Русиновым М.М. [7] – синтез оптической системы из элементов с

известными свойствами, делящихся на силовые, коррекционные и коррекционно-силовые;

- метод расчета по частям – оптическая система разделяется на части, каждая из которых рассчитывается отдельно (микроскопы, зрительные трубы);
- модульный принцип – развитие композиционного метода, синтез осуществляется из оптических модулей с известными свойствами (асферика, апланаты, гиперхроматические линзы)

Если рассматривать основные источники сведений о конструкциях объективов переменного фокусного расстояния – патентные материалы, заводская документация и образцы объективов, то эти источники дают разрозненные сведения о конструкциях и их отдельных элементах, не содержат никакого анализа или обобщений и рекомендаций, способствующих рациональному выбору конструкций и организации рациональных технологических процессов изготовления новых образцов.

Проектирование объективов с переменным фокусным расстоянием в большинстве случаев зависит от личного производственного опыта и профессиональных навыков проектировщика. При проектировании объектива с переменным фокусным расстоянием, разработчик проходит основные этапы, являющиеся общими при проектировании любых других оптических систем: синтез, анализ, оптимизация [8]. На рисунке 1.6 приведена схема процесса автоматизированного проектирования оптических систем.

На этапе синтеза оптической системы определяется ее исходная схема, удовлетворяющая заданным характеристикам и являющаяся исходной системой для оптимизации [9].

На этапе анализа оценивается оптическая система. Анализируемая система проходит несколько уровней оценки, отличающихся полнотой и трудоемкостью. На начальных уровнях определяются параксиальные характеристики системы, на следующих уровнях рассчитывается ход реальных

лучей, вычисляются aberrаций системы, затем оценивается качество изображения, формируемого оптической системой.

На этапе оптимизации параметры системы постепенно изменяются так, что значения характеристик системы улучшаются. Процесс оптимизации системы автоматизирован, в его основу положен довольно сложный математический аппарат. После оптимизации системы разработчик либо снова переходит на этап анализа, либо переходит на этап синтеза оптической системы и снова последовательно проходит все следующие этапы [9].

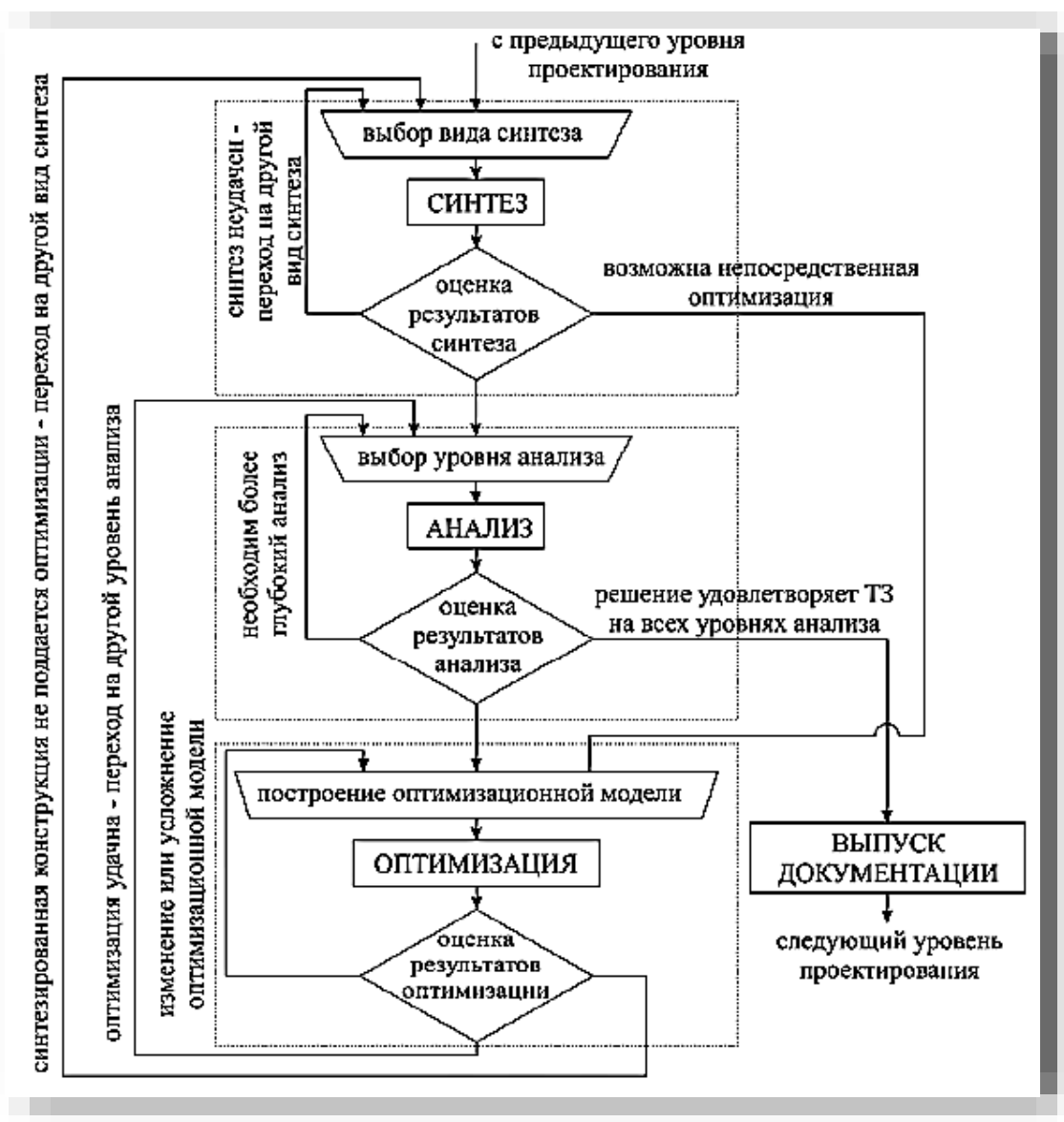


Рисунок 1.6 – Схема процесса автоматизированного проектирования оптических систем

Итогом полученного решения является выпуск документации на оптическую систему и ее компоненты.

Для проектирования оптических систем переменного фокусного расстояния (ОСПФР) из вышеперечисленных методов подходит алгебраический метод расчета, которым пользуются некоторые расчетчики на этапе синтеза, либо выбор аналога. Предлагаемый в данной работе метод можно отнести к комбинированному – использование алгебраического метода расчета при получении исходной системы и композиционного, при переходе от исходной системы к реальной.

Следует отметить, что чем выше выходные параметры объектива (требуемое качество изображения, относительное отверстие, кратность изменения фокусного расстояния и др.), тем сложнее схема и конструкция объектива.

### 1.3 Объективы с переменным фокусным расстоянием

Современный оптико-электронный прибор должен иметь большое поле зрения для обнаружения быстро перемещающихся предметов и слежения за ними и, одновременно, достаточное увеличение для распознавания предметов, находящихся на больших расстояниях. Выполнить эти требования одновременно невозможно. В связи с этим находят все более широкое применение панкратические объективы – оптические системы с плавным изменением увеличения и, соответственно, поля зрения.

Панкратическая часть телевизионной системы должна удовлетворять следующим условиям:

- во всем диапазоне изменения фокусного расстояния изображение должно оставаться неподвижным, оставаясь в плоскости фоточувствительного слоя приемной матрицы;
- во всем диапазоне изменения фокусного расстояния положение выходного зрачка не должно изменяться – это позволит минимизировать aberrации изображения;

- во всем диапазоне изменения фокусного расстояния должно обеспечиваться требуемое качество изображения.

Требования к качеству изображения таких систем вытекают из требований, предъявляемых к идеальной оптической системе. Напомним эти требования:

- лучи, вышедшие из точки предмета, после прохождения через оптическую систему должны собраться в соответствующую точку изображения;
- изображение наблюдаемого плоского предмета, перпендикулярного к оптической оси системы, должно лежать в плоскости изображений системы;
- форма изображения плоского предмета, расположенного перпендикулярно к оптической оси, должна соответствовать форме предмета;
- оптическая система должна обеспечивать точную передачу цвета.

Следует отметить, что приведенные требования не могут в полной мере быть выполнены, можно лишь максимально приблизиться к их реализации усложнением оптической системы.

Рассмотрим принципы конструирования объективов переменного фокусного расстояния, выведенные еще при реализации первых таких объективов.

Во многих панкратических объективах каждый компонент реализуется как ахромат. При этом небольшой остаточный хроматизм остается почти постоянным во всем диапазоне перемещения компонентов.

Проектируя четырехкомпонентный панкратический объектив, можно задать, например, чтобы первый и четвертый компоненты были неподвижные, а второй и третий – подвижные. Первый компонент должен обеспечивать постоянное положение фокуса объектива независимо от положения подвижных компонентов, а апертурная диафрагма должна располагаться вблизи четвертого

компонента, что обеспечит независимость положения выходного зрачка системы от положения компонентов [10, 21].

Изменение линейного увеличения, осуществляемое одной группой линз, изменяет расстояние между предметом и изображением для данной группы. Для тонкой линзы с фокусным расстоянием  $f'$  расстояние между предметом и изображением

$$l = f' \cdot \left( 2 - V - \frac{1}{V} \right), \quad (1.1)$$

где  $V$  – линейное увеличение (обычно величина  $V$  отрицательна) [11].

То есть перемещение компенсатора (компонента, сохраняющего положение фокуса) будет минимальным, если линейное увеличение системы изменяется симметрично относительно единичного увеличения. Например, если диапазон линейного увеличения системы изменяется от 4 до 1, линейное увеличение вариатора (компонента, осуществляющего изменение увеличения) изменяется от 0,5 до 2.

По такому принципу сконструирован объектив (патент США 685,945), схема которого приведена на рисунке 1.7 [10]. Фокусное расстояние объектива изменяется в диапазоне 103...506 мм; относительное отверстие составляет 1:5,7; положение выходного зрачка меняется с изменением фокусного расстояния. Объектив состоит из пяти дублетов. Первые четыре дублета составляют афокальную систему. Первый и четвертый дублеты одинаковы, также как и второй и третий. Пятый дублет фокусирует коллимированный пучок и формирует действительное изображение. Все дублеты являются апохроматами, что автоматически корректирует хроматизм положения и увеличения, выраженные через коэффициенты Зейделя  $C_1$  и  $C_2$  соответственно во всем диапазоне перемещения компонентов. Сумма Петцваля (кривизна поля) не зависит от положения компонентов [10].

Рассматривая афокальную часть системы отдельно, можно найти положение единичного увеличения (рис. 1.7), в котором афокальная система является симметричной; если диафрагма расположена в центре афокальной

системы, aberrации нечетных порядков равны нулю, то есть из рассматриваемых aberrаций – сферическая aberrация, астигматизм, кривизна поля, соответственно  $S_1$ ,  $S_3$  и  $S_4$ , имеем постоянную aberrацию  $S_4$ .

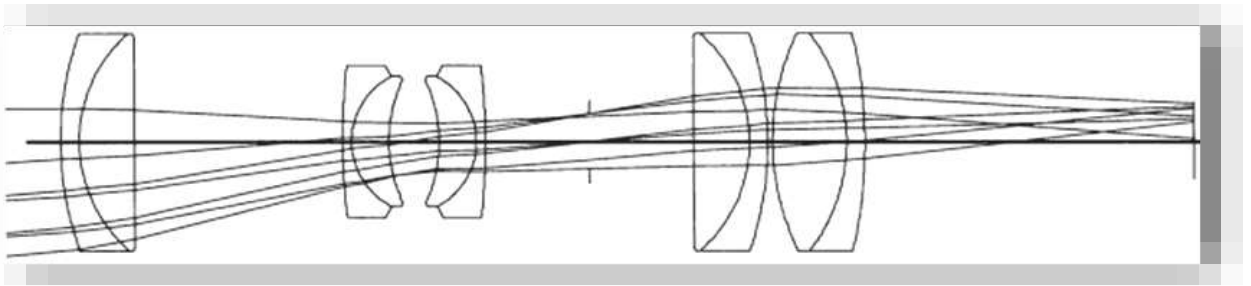


Рисунок 1.7 – Панхроматический объектив (патент США 685,945)

Все геометрические aberrации, скорректированные для конфигурации, имеющей увеличение  $\sqrt{5}$ , скорректированы и для конфигурации с увеличением  $1/\sqrt{5}$ .

Таким образом, для конфигурации с единичным увеличением рассматриваются сферическая aberrация и астигматизм, характеризуемые коэффициентами Зейделя  $S_1$ ,  $S_3$  соответственно, для конфигурации, имеющей увеличение  $\sqrt{5}$  – сферическая aberrация, кома, астигматизм и дисторсия, выраженные через коэффициенты Зейделя  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  и  $S_5$  соответственно. Данный пример иллюстрирует три основных принципа конструирования панхроматических систем [10]:

- расположение компонентов – положительный-отрицательный-отрицательный-положительный – является подходящим для реализации широкого диапазона изменения увеличения;
- каждый компонент является ахроматом;
- последний неподвижный компонент исправляет aberrации предыдущей части объектива.

Более современный панхроматический объектив, патент США 4,763,998 (рисунок 1.8) также состоит из четырех компонентов и имеет перепад увеличения с 1 до 11,5 [10]. Последний неподвижный компонент более сложный, чем в предыдущем случае, фокусировка осуществляется



перемещением передних компонентов. Диапазон изменения фокусного расстояния от 10 мм до 114,5 мм; линейное поле зрения в пространстве изображений составляет 35 мм; относительное отверстие 1:1,56, что обеспечивает высокую светосилу прибора.

Объектив имеет неисправленную дисторсию, варьируемую от 4% до 8% в зависимости от фокусного расстояния.

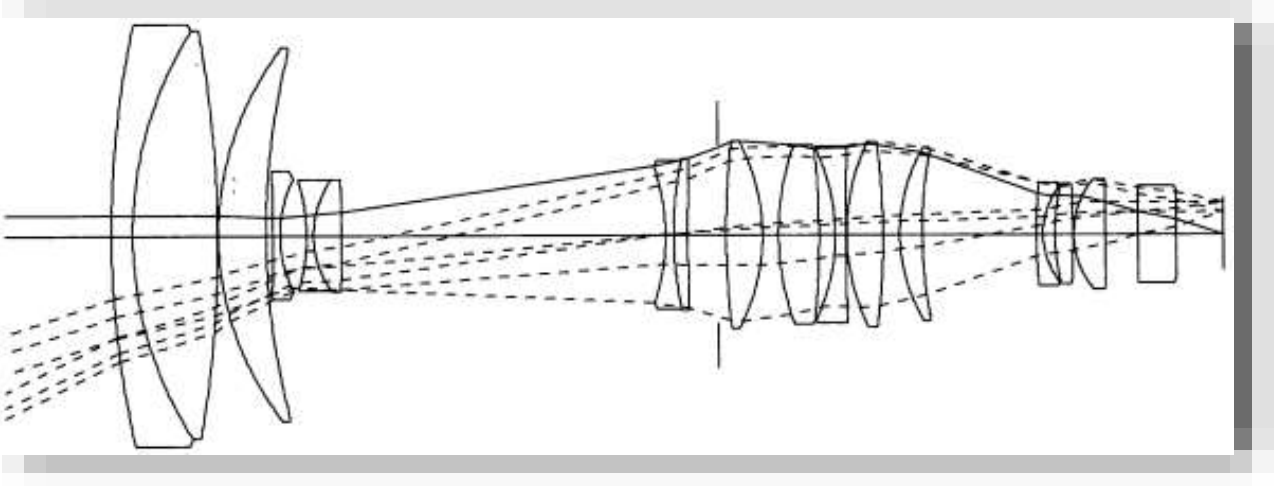


Рисунок 1.8 – Панкратический объектив (патент США 4,763,998)

Объектив (патент США 4,560,253) состоит из двух компонентов, причем первый компонент содержит одну асферическую линзу (рис.1.9, а) [10]. Первые три линзы объектива исправляют сферическую aberrацию.

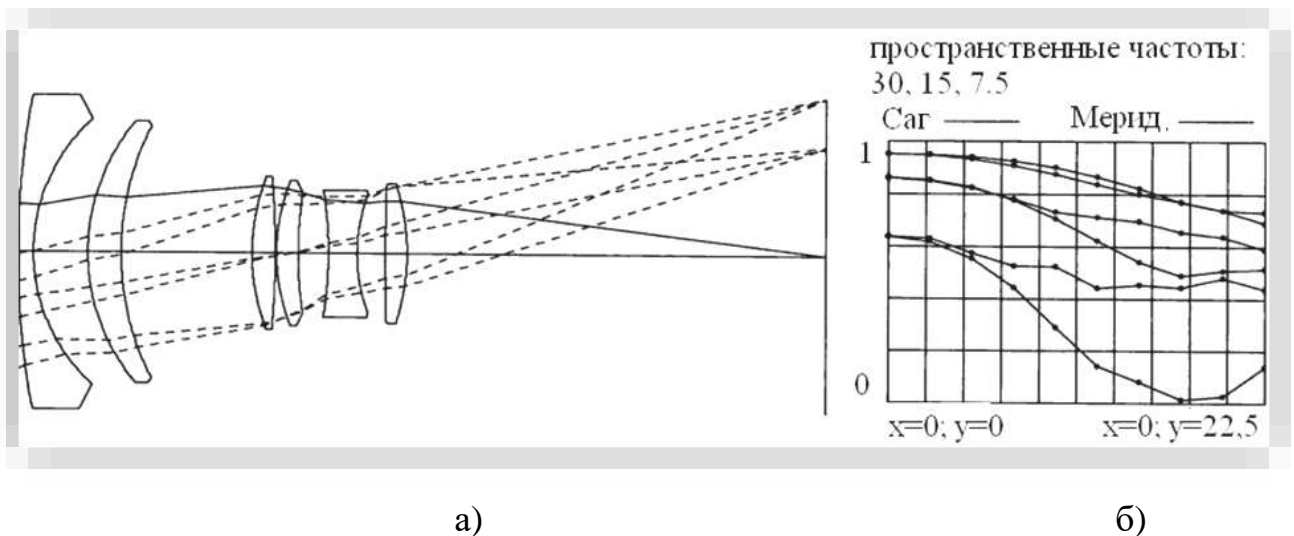


Рисунок 1.9 – Панкратический объектив (патент США 4,560,253):

а) оптическая схема; б) зависимость величины контраста от поля для трех пространственных частот – 30; 15; 7,5

Диапазон изменения фокусного расстояния объектива – 36 - 68 мм; относительное отверстие – 1:3,8; линейное поле в пространстве изображений  $2y'=35$  мм; значение контраста на пространственной частоте  $30 \text{ мм}^{-1}$  для поля  $2y'=16,4$  мм составляет в меридиональной плоскости около 0,39; в сагиттальной плоскости – 0,17; для поля  $2y'=22,5$  мм значение контраста в меридиональной плоскости составляет 0,43; в сагиттальной – 0,15; для поля  $2y'=31,2$  мм в меридиональной плоскости – 0,4; в сагиттальной – 0,55. Астигматизм и кривизна поля окончательно не скорректированы (рис. 1.9, б). При фокусном расстоянии 36 мм объектив имеет неисправленную дисторсию. Также с изменением фокусного расстояния изменяется положение выходного зрачка и длина объектива.

Другой объектив (патент США 5,296,969) состоит из четырёх компонентов, подвижными являются второй, четвертый, и имеет 2 асферические линзы [10]. Четвёртый компонент осуществляет фокусировку системы, что позволяет уменьшить размер переднего компонента.

Диапазон изменения фокусного расстояния составляет от 6,7 мм до 50,4 мм; относительное отверстие – 1:1,54; линейное поле в пространстве изображений  $2y'=25,5$  мм. Значение контраста на пространственной частоте  $50 \text{ мм}^{-1}$  для поля 25,2 мм составляет в меридиональной плоскости около 0,25; в сагиттальной плоскости – 0,45, т.е., в данной системе не устранен астигматизм. Следует отметить, что при изменении фокусного расстояния изменяется положения выходного зрачка объектива.

На рисунке 1.10 приведен 10-кратный механически компенсируемый объектив ( $10\times$  МКПО) [12]. Фокусное расстояние изменяется в диапазоне от 15 мм до 150 мм; размер изображения  $2y'=16$  мм; относительное отверстие составляет 1:2,4, что обеспечивает высокую светосилу.

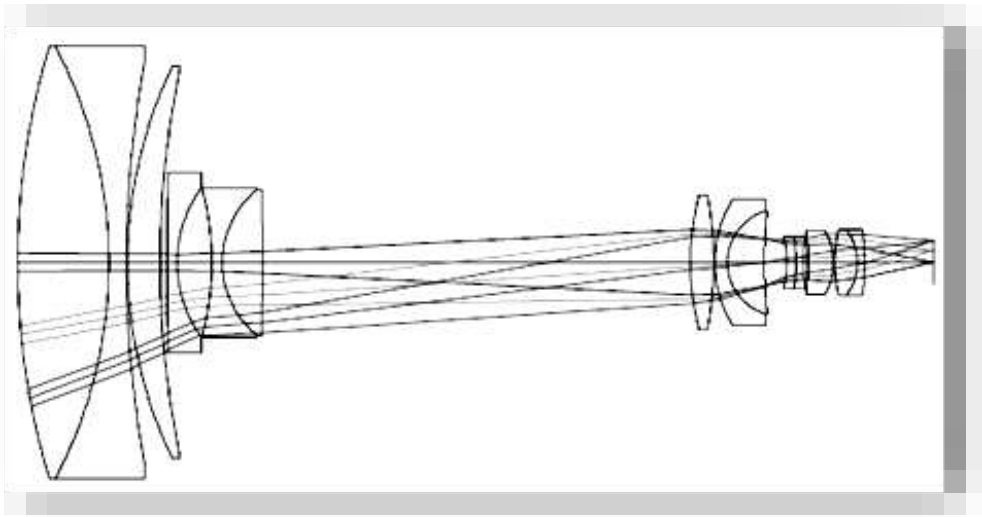


Рисунок 1.10 –  $10\times$  механически компенсируемый панкратический объектив

В данной системе не скорректированы дисторсия, кривизна поля, сферическая абберация.

Светосильный объектив с диапазоном изменения фокусного расстояния от 100 мм до 200 мм при небольшой кратности имеет высокие частотно-контрастные характеристики. Так на частоте  $50 \text{ мм}^{-1}$  величина контраста равна 0,7 [12].

Панкратический объектив нормальной светосилы с диапазоном изменения фокусного расстояния от 25 мм до 125 мм и светосильный панкратический объектив с диапазоном изменения фокусного расстояния от 20 мм до 110 мм имеют подвижную апертурную диафрагму, в результате чего с изменением фокусного расстояния меняется освещенность изображения [12]. Также в данных системах не устранен астигматизм. Те же недостатки имеет панкратический объектив средней светосилы с диапазоном изменения фокусного расстояния от 12 мм до 234 мм [12].

Объектив «Алькор-7» имеет исправленные хроматические абберации, дисторсию [13]. Относительное отверстие составляет 1:4, диапазон изменения фокусных расстояний от 59,7 мм до 360 мм. Значение контраста на пространственной частоте  $50 \text{ мм}^{-1}$  равно 0,63.

Светосильный панкратический объектив (патент 5,424,869 США) имеет диапазон изменения фокусных расстояний от 5,3 мм до 30,7 мм; линейное поле

$2y'=5$  мм; значение контраста на пространственной частоте  $50 \text{ мм}^{-1}$  равно 0,65 [10]. Система имеет неисправленную дисторсию.

Объектив (патент 2289833 РФ) относится к объективам с переменным фокусным расстоянием [14].

Второй и четвертый компоненты установлены с возможностью перемещения вдоль оптической оси, а сумма оптических сил компонентов не превышает  $0,00036 \text{ мм}^{-1}$ .

Объектив работает в спектральном диапазоне от 770 нм до 910 нм, фокусное расстояние объектива изменяется в пределах от 13,6 до 80 мм, относительное отверстие 1:2,6...1:2,5, поле зрения  $2\omega=26^\circ 29' \times 24^\circ \dots 4^\circ 35' \times 3^\circ 26'$ . Сферохроматизм не более 0,016 мм, астигматизм не более 0,016 мм, относительная дисторсия 1%, aberrации широких пучков не более 0,02 мм.

Оптическая схема такой системы не позволяет получить диапазон изменения фокусных расстояний объектива более 5-крат при сохранении требуемого качества изображения.

Объектив (патент 22727 РФ, рис. 1.11) может использоваться как объектив видеокамеры с формированием изображения на фоточувствительной матрице [15].

Второй и третий компоненты установлены с возможностью перемещения вдоль оптической оси. Обеспечивается расширение диапазона изменений фокусных расстояний панкратического объектива при одновременном сохранении высокого качества изображения.

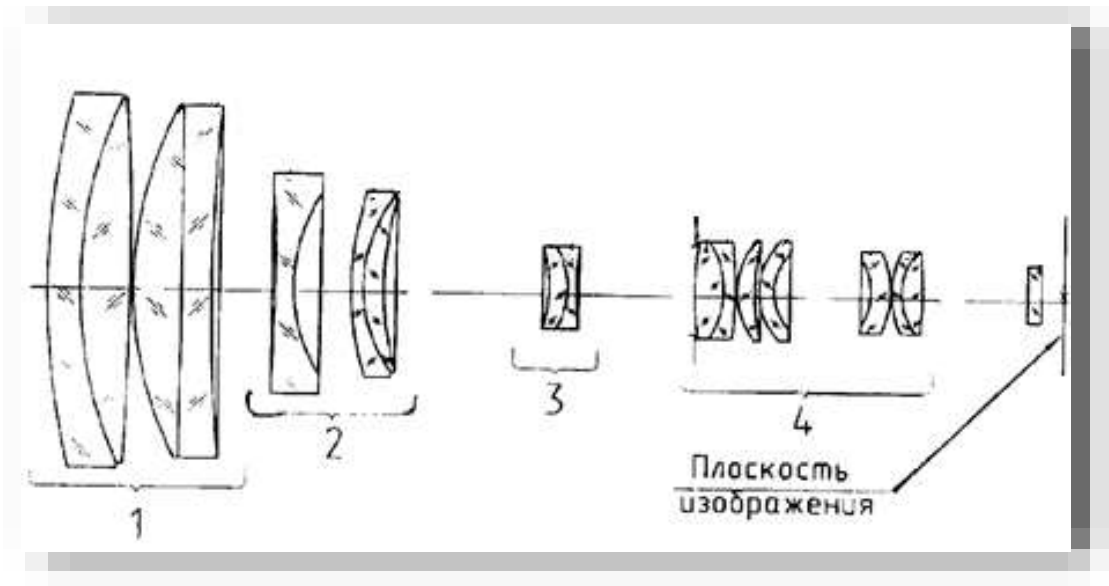


Рисунок 1.11 – Панкратический объектив (патент 2262727)

Объектив имеет рабочий диапазон от 500 нм до 900 нм; фокусное расстояние от 23 мм до 276 мм; задний фокальный отрезок объектива 31,7 мм; относительное отверстие 1:2,5...1:2,5; поле зрения  $2\omega=20^{\circ}22' \dots 1^{\circ}40'$ . Сферическая aberrация не превышает 0,01 мм, астигматизм, не более 0,02 мм, относительная дисторсия 2%, aberrации широких пучков, не более 0,018 мм. Объектив позволяет получить большой перепад фокусных расстояний при сохранении требуемого качества изображения.

Характеристики рассмотренных панкратических объективов приведены в табл.1.2 и табл.1.3.

В таблице приводится число  $C$ , выражающее приближенную зависимость между оптическими характеристиками и габаритами, рассчитанное по следующей формуле [13, 21]:

$$C = \frac{f'_{\max} \cdot \varepsilon}{L - \frac{1,2 \cdot f'_{\max}}{\sqrt{m}}}, \quad (1.2)$$

где  $f'_{\max}$  – максимальное фокусное расстояние системы;  $\varepsilon$  – относительное отверстие;  $m$  – кратность изменения фокусных расстояний;  $L$  – общая длина системы. Константа  $C$  характеризует добротность системы.

В таблицах используются следующие обозначения:  $f'_{min}$  – минимальное значение фокусного расстояния, выраженное в миллиметрах;  $f'_{max}$  – максимальное значение фокусного расстояния;  $\Delta f'$  – диапазон изменения фокусных расстояний;  $L/f'_{max}$  – отношение общей длины системы к максимальному значению фокусного расстояния;  $K$  – диафрагменное число;  $2y'$  – линейное поле зрения системы в пространстве изображений;  $T$  – меридиональная плоскость;  $S$  – сагиттальная плоскость.

Таблица 1.2 – Характеристики панкратических объективов

№ п/п	Наименование объектива	Число компонентов/номер подвижного компонента	Число линз/число асферик (если имеются)	$L$ , мм	$f'_{min}$ , мм	$f'_{max}$ , мм	$2y'$ , мм
1	Панкр. объектив, $\Delta f'=25\dots 125$ мм	5/ 2...4	21/0	476	25	125	52
2	Патент 2289833 РФ	4/ 2; 3	12/0	367	13,6	80	7
3	Панкр. объектив, $\Delta f'=20\dots 110$ мм	4/ 2; 3	14/0	404,5	20	110	32
4	Панкратический объектив, 100...200 мм	5/ 2...4	14/0	367	100	200	62
5	Патент 685,945 США	4/ 2; 3	10/0	636	103	506	42
6	10 <sup>x</sup> МКПО	4/ 2; 3	14/0	311	15	150	32
7	Панкр. объектив, $\Delta f'=12\dots 234$ мм	4/ 2; 3	15/0	303,5	12	234	16
8	Алькор-7	5/ 2...4	15/0	412,7	59,7	360	12
9	Патент 2262727 РФ	4/ 2; 3	16/0	367	23	276	8,5
10	Патент 4,560,253 США	2/ 1; 2	6/1	98	36	68	32
11	Патент 5,424,869 США	4/ 2; 4	9/0	54	5,3	30,7	5
12	Патент 4,763,998 США	4/ 2; 4	16/2	159	10	114	11
13	Патент 5,296,969 США	4/ 2; 4	9/0	60	6,7	50,4	25,5

Таблица 1.3 – Относительные характеристики панкратических объективов, отн. ед.

№ п/п	Наименование объектива	$L/f'_{max}$	$m$	$K$	Значение контраста на пространственной частоте $50 \text{ мм}^{-1}$			$C$
					в центре поля	на краю поля		
						$T$	$S$	
1	Панкр. объектив, $\Delta f'=25\dots 125 \text{ мм}$	3,8	5,0	4,0	0,75	0,25	0,55	0,08
2	Патент 2289833 РФ	4,6	5,9	2,6	0,49	0,35	0,63	0,09
3	Панкр. объектив, $\Delta f'=20\dots 110 \text{ мм}$	3,7	5,5	2,0	0,6	0,3	0,4	0,16
4	Панкратический объектив, 100...200 мм	1,8	2,0	5,0	0,7	0,7	0,5	0,20
5	Патент 685,945 США	1,3	4,9	5,7	0,6	0,3	0,5	0,25
6	$10^{\times}$ МКПО	2,1	10,0	2,4	0,6	0,25	0,2	0,25
7	Панкр. объектив, $\Delta f'=12\dots 234 \text{ мм}$	1,3	19,5	2,9	0,65	0,55	0,65	0,34
8	Алькор-7	1,2	6,0	4,0	0,63	0,55	0,6	0,38
9	Патент 2262727 РФ	1,3	12,0	2,5	0,7	0,28	0,47	0,41
10	Патент 4,560,253 США	1,4	1,9	3,8	0,6	0,3	0,45	0,46
11	Патент 5,424,869 США	1,8	5,8	1,7	0,65	0,35	0,45	0,47
12	Патент 4,763,998 США	1,4	11,4	1,6	0,7	0,3	0,4	0,60
13	Патент 5,296,969 США	1,2	7,5	1,5	0,75	0,3	0,45	0,86

Оптические характеристики панкратических объективов – кратность, пределы абсолютных значений изменения фокусных расстояний,

относительное отверстие, углы поля зрения – целиком зависят от числа компонентов, входящих в систему и ее габаритов [13]. Так четырехкомпонентные светосильные малогабаритные системы с двух-трехкратным изменением фокусных расстояний содержат 9 – 14 линз, а объективы с широким интервалом изменения фокусных расстояний (восьмидесятикратным) содержат 15 – 18 и более линз. Константа  $C$ , характеризующая добротность системы, для хороших объективов имеет значение выше 0,4 [13].

К примеру, панкратический объектив, стоящий под пунктом 9 относится к объективам хорошего качества, а с помощью четырехкомпонентных объективов (пункты 11 – 13), имеющих большую кратность изменения фокусных расстояний и большое относительное отверстие, можно получить более высокое качество изображения.

Полученное значение коэффициента  $C$ , равное 0,86, объектива пункта 13 можно объяснить большой кратностью объектива, его высокой светосилой и близким значением максимального фокусного расстояния к общей длине объектива, а малые значения коэффициента  $C$  объективов пунктов 1-3 – большой величиной отношения общей длины системы к максимальному значению фокусного расстояния  $L/f'_{max}$ .

#### 1.4 Автоматизированное проектирование оптических систем зарубежными разработчиками (на примере фирмы *Canon*)

При рассмотрении современных зарубежных объективов с переменным фокусным расстоянием следует отметить следующее.

Сочетание последних технологий, опыта и накопленных знаний позволяют создавать объективы с переменным фокусным расстоянием хорошего качества, разнообразие которых наблюдается в современном рынке. Как правило, это объективы фирм *Sony*, *Canon*, *Nikon* отличающиеся высокой стоимостью. Высокое качество изображения в таких объективах достигается применением в них асферических линз с особым профилем, флюорита, особых стекол, например, стекло со сверхнизкой дисперсией, позволяющих устранять



дисторсию в широкоугольных объективах переменного фокусного расстояния. Также такие объективы имеют относительно небольшие габариты и вес.

Следует отметить, что создание ОС, в целом определяется рядом действий. Рассмотрим этапы проектирования ОС зарубежными разработчиками на примере фирмы *Canon* [16].

В начале, при заданных параметрах, определяется наиболее подходящая конфигурация системы с помощью специального программного обеспечения, в основу которого положен алгоритм оценки исходной системы, использующийся для нахождения оптимального решения. Далее полученная на предыдущем этапе система анализируется с помощью абберационного алгоритма и специального метода, разработанного фирмой *Canon*, после чего определяется конфигурация системы. Для определения в короткий промежуток времени конечного варианта исходной оптической системы, применяются аналитические методы решения, основанные на обширной базе накопленной информации, теории и большом обобщенном опыте проектирования оптических систем.

После этого, на суперкомпьютере многократно выполняется следующий цикл проектирования: трассировка лучей через ОС → оценка системы → автоматизированное проектирование системы → изменение конструктивных параметров системы → трассировка лучей через ОС. На этом этапе, как показано на рисунке 1.12, автоматически подбираются конструктивные параметры всей системы, т.е. находится оптимальная конструкция системы, при которой все aberrации сведены к минимуму.

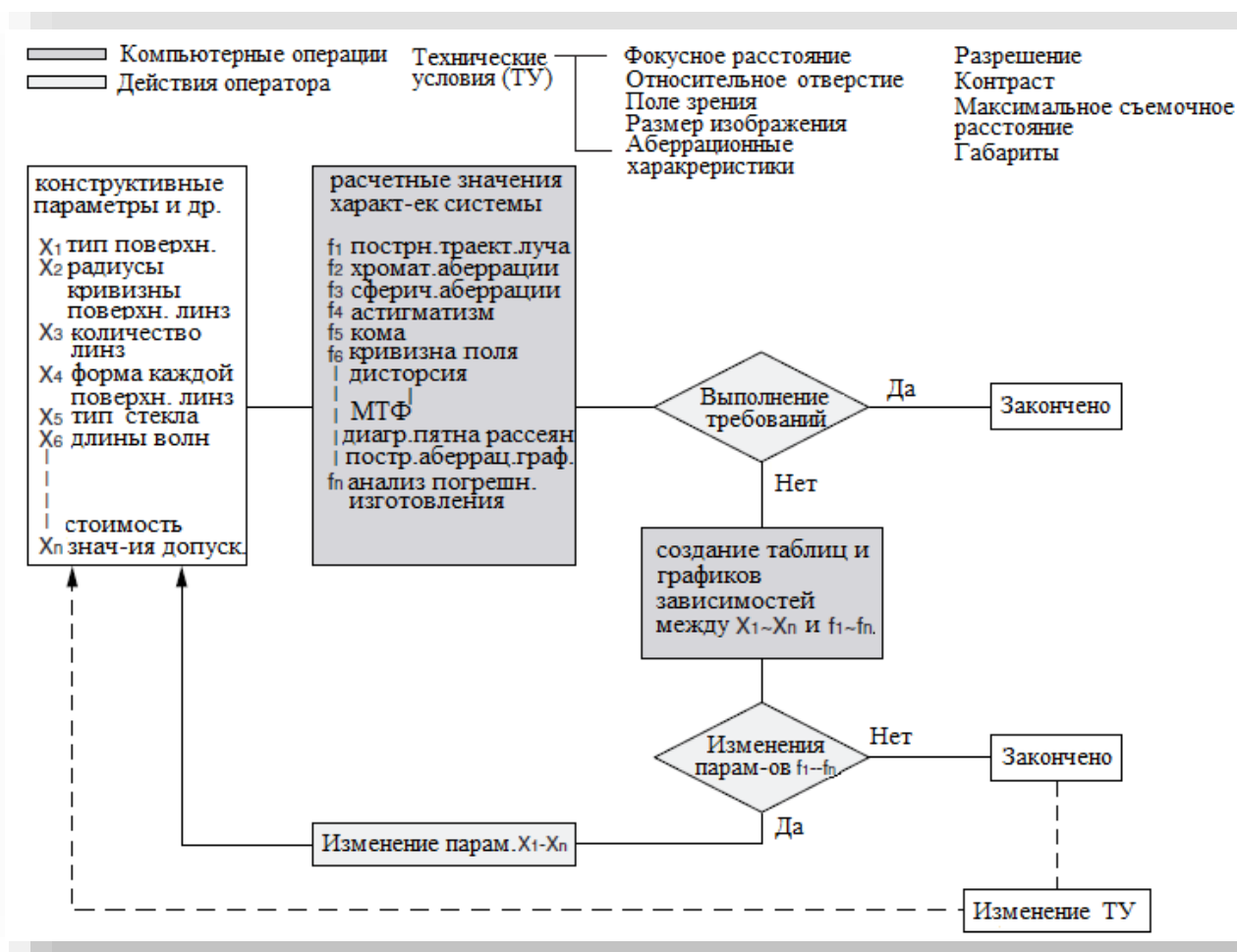


Рисунок 1.12 – Схема автоматизированного проектирования оптической системы

На данном этапе проектирования системы выполняется большой объем сложных вычислений.

Программное обеспечение и положенный в его основу метод автоматизированного проектирования оптических систем являются разработкой фирмы *Canon*. С помощью простого ввода искомых значений в короткий период времени находится оптимальное решение.

Таким образом, нахождение оптимальной конструкции совершается постепенно (гладко): задаются начальные данные и целевые значения в системе автоматического проектирования, оцениваются результаты моделирования и устанавливаются пересчитанные оптимальные значения, минимизирующие аберрации оптической системы. Работа оператора с компьютером, построена

так, что оператор в ходе проектирования может делать промежуточные оценки, которые в итоге приводят к почти идеальным результатам.

В качестве примера процесса проектирования оптической системы рассмотрим ультракомпактный 28 - 105 мм объектив переменного фокусного расстояния [16]. Объектив имеет четыре компонента, второй из которых отрицательный. Все компоненты объектива подвижны. Оптимальный тип линз компонентов оптической системы и распределение в них оптических сил определяется с помощью программного обеспечения. На этом этапе проектирования возможно оценить различные детали, например, выбор кулачка, определение величины удлинения системы и ее общей длины, диаметр первой линзы, задний фокальный отрезок. Линзы оптической системы, представленной на рисунке 1.13, выбраны из оптимального решения, определяемого особыми условиями. На этом этапе моделируется прохождение света через оптическую систему и, используя различные алгоритмы расчета aberrаций системы, определяется минимальное количество линз для каждого компонента.

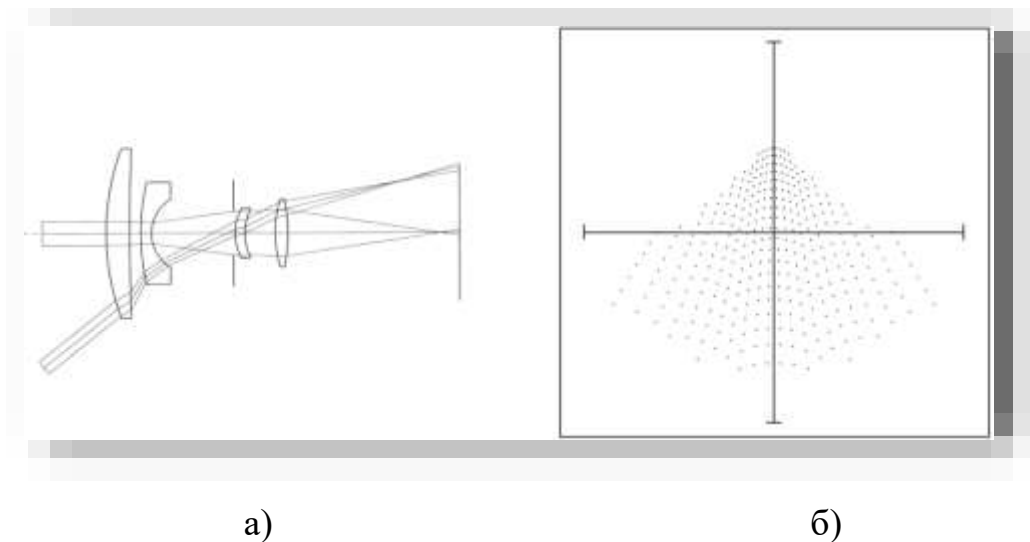
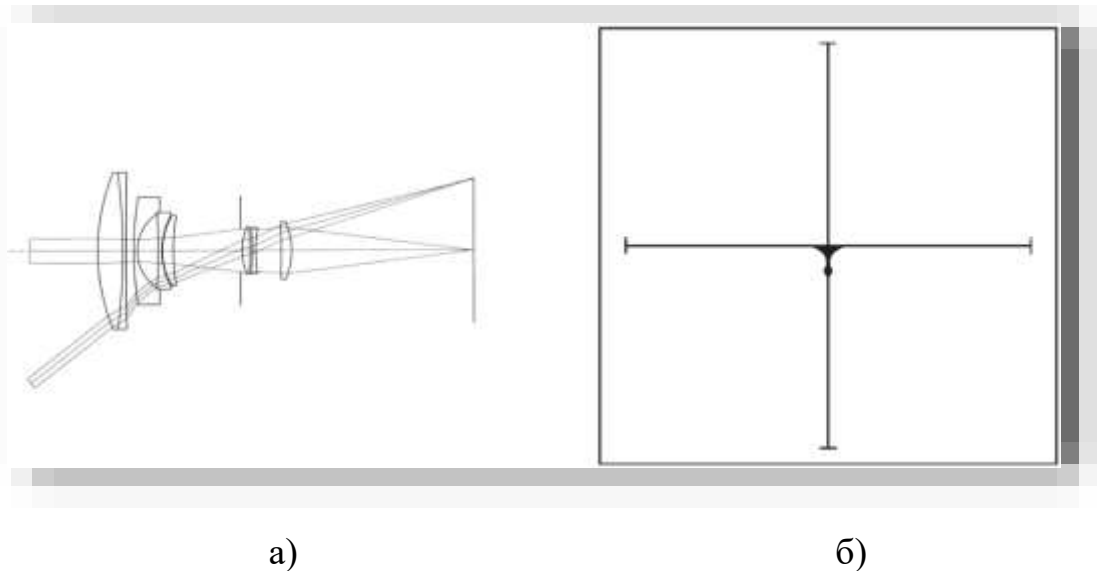


Рисунок 1.13 – а) конфигурация объектива на начальном этапе проектирования;  
б) пятно рассеяния

Далее устраняются флуктуации aberrаций системы при перемещении первого компонента, для этого к одиночной линзе первого компонента добавляется еще одна линза, т.е. первый компонент будет состоять из

склеенной линзы. Второй компонент в большой степени влияет на увеличение системы, поэтому должен обладать большой оптической силой, кроме того является фокусирующим компонентом, поэтому флуктуации aberrаций системы при его перемещении должны быть полностью устранены. Для этого ко второму компоненту добавляются две линзы – положительная и отрицательная. Третий компонент – положительная короткофокусная линза, таким образом, для исправления хроматизма положения и сферической aberrации к ней добавляется вторая линза.

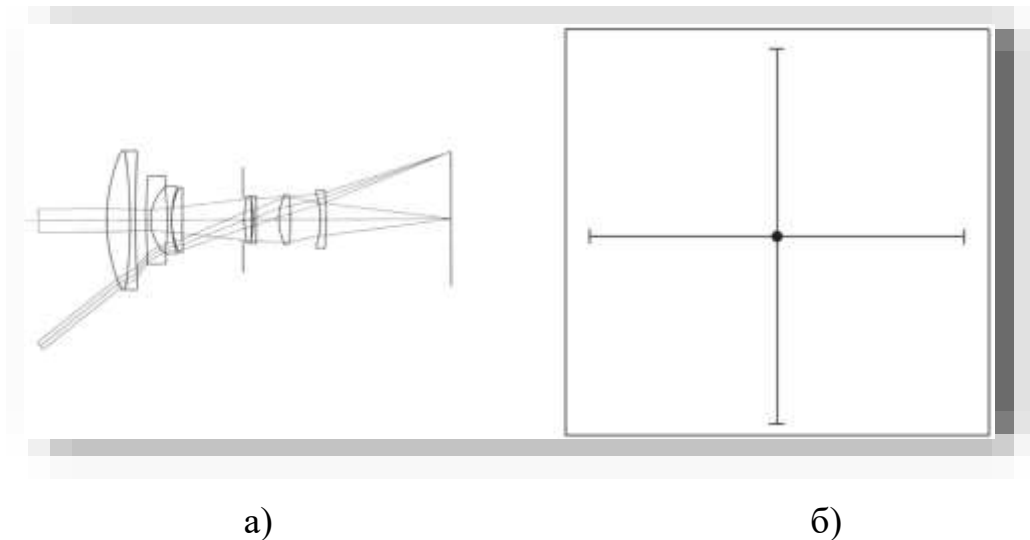
Итак, определилось минимальное количество линз, и после нескольких циклов работы программы автоматического проектирования была получена система, представленная на рисунке 1.14.



Рисунке 1.14 –а) конфигурация объектива на промежуточном этапе проектирования; б) пятно рассеяния

Из графика, представленного на рисунке 1.14, видно, что пятно рассеяния, формируемое в плоскости изображения системы, стало значительно меньше.

Следует отметить, что для лучшей коррекции комы и астигматизма больших углов поля зрения, к четвертому компоненту была добавлена асферическая линза, обращенная асферической поверхностью к плоскости изображения, рисунок 1.15.



Рисунке 1.15 – а) конечная конфигурация объектива; б) пятно рассеяния

Таким образом, была найдена нужная конфигурация оптической системы, технические условия, такие как съемочное расстояние, апертура, фокусные расстояния, были занесены в уравнение алгоритма, программа автоматического проектирования совершала многократные циклы поиска удовлетворительных конструктивных параметров, таких как материалы стекол и распределение оптических сил компонентов в системе. Как видно из рисунка 1.15, пятно рассеяния, формируемое в плоскости изображения системы, предельно мало.

Из выше сказанного следует, что зарубежные фирмы по производству оптических приборов, продукция которых широко востребована, при расчете оптики используют собственные программные пакеты, имеют многолетний опыт проектирования и обширную базу накопленной информации, поэтому более конкретно ознакомиться или заимствовать у них что-либо не представляется возможным.

### 1.5 Методы синтеза объективов переменного фокусного расстояния

Как отмечалось ранее, при проектировании объектива с переменным фокусным расстоянием на этапе синтеза необходимо получить его исходную систему. Поскольку программные пакеты для расчета оптических систем не обладают такими возможностями, за редким исключением, исходная система

может быть взята из существующих объективов переменного фокусного расстояния в качестве аналога и далее оптимизирована под требуемые технические условия, т.о. исключается математический расчет, а следовательно и этап синтеза. Однако, выбор аналога требует трудоемкого патентного поиска, и этот выбор влияет на патентную чистоту, к тому же может быть не найдена более удачная конфигурация объектива. Другой путь – это рассчитать начальный вариант такого объектива в тонких компонентах и затем перейти к компонентам конечной толщины. При этом, если некоторые методики перехода к толстым компонентам удается достаточно успешно автоматизировать, то этап синтеза системы в тонких компонентах является на сегодняшний день наиболее «творческим» и наименее «стандартизованным» процессом [17].

Существует множество методов расчета объективов переменного фокусного расстояния, рассмотрим некоторые из них.

В работе [17] предлагается подход, который объединяет расчет гауссовых и абберационных параметров панкратического объектива в тонких компонентах в один этап. Расчет проводится в едином пространстве аргументов первого и второго этапов, в качестве которого выбрано пространство углов и высот первого вспомогательного луча и основных абберационных параметров тонких компонентов. Повышение универсальности методики достигается путем использования более формального задания панкратической системы в виде дискретной совокупности положений с несложными условиями связи, объединяющими их в систему.

На основе начальных данных по специальному алгоритму происходит поиск исходного варианта панкратической системы и дальнейшая его оптимизация в объединенном пространстве углов, высот и основных абберационных параметров по целевой функции, составленной на основе условий трех типов: геометрические ограничения для отдельных конфигураций объектива; абберационные ограничения для отдельных конфигураций; панкратические ограничения (связывающие отдельные конфигурации в систему) [17].

В работе [18] методика предусматривает последовательное выполнение трёх этапов: приведение исходной схемы вариообъектива к обобщённой одно-, двух- или трёхкомпонентной панкратической системе; определение гауссовых параметров обобщённой системы; обратный переход от обобщённой системы к исходной. Множество полученных таким образом систем анализируется с помощью целевой функции, которая по специально разработанному критерию оценивает их качество. Также в работе [18] рассматривается подход, позволяющий определить световые диаметры компонентов, а также размер и положение апертурной диафрагмы. Предлагается методами оптимизации путём минимизации целевой функции, выбрать из множества рассчитанных вариантов наилучший. Изложенные в работе [18] методы позволяют рассчитать гауссовы параметры вариообъективов и определить оптимальное положение входного зрачка при заданном перепаде фокусных расстояний, диафрагменных числах и конструктивных ограничениях. Данные методы легко алгоритмируются, алгоритмы отличаются хорошей сходимостью, а их программные реализации быстротой расчётов.

В работе [19] используется видоизменённая формула расчёта коэффициентов Зейделя, с помощью которой рассчитываются конструктивные параметры элементов оптической системы переменного увеличения, а также имеется возможность определить какие из элементов системы будут дублетом или триплетом. С помощью коэффициентов Зейделя определяются значения остаточных аберраций оптической системы без конкретных данных о типе каждого элемента системы.

В работе [20] предложен метод, в котором используются полиномы для представления обратного увеличения и смещения 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 системы переменного увеличения.

В работе [41] найдено дифференциальное уравнение, связывающее изменение увеличения отдельных компонентов системы переменного увеличения при их бесконечно малом перемещении со смещением плоскости изображения.

В работе [22] приводится комплексный аналитический метод расчета закона перемещения подвижных компонентов, являющийся неитеративным аналитическим расчетом. Метод позволяет получить систему с любым количеством компонентов и накладываемых ограничений. Полагают, что объект находится на конечном расстоянии, расстояния между компонентами системы задаются так, чтобы поперечное увеличение системы имело желаемую величину, и определяются через ход параксиального луча. Расстояние до объекта является переменной величиной. С помощью аналитического метода получают закон перемещения компонентов системы и положения объекта. Накладываемые условия позволяют получить нужное значение увеличения системы после интерполяции.

В работе [23] приводится метод, основанный на эволюционном программировании, в основу которого положен генетический алгоритм.

Генетический алгоритм имеет конструктивные переменные, представлены фиксированными строками, т. е. генами. Ген представляется двоичным циклическим кодом, обеспечивая соответствие смежных фенотипов смежным генотипам. Каждый компонент популяции декодирован. Вначале хромосома, представленная двоичным кодом, преобразуется в бинарную форму и далее находится десятичное значение каждой переменной декодированием бинарной строки. Полученные десятичные значения являются нормированными значениями оптических сил компонентов системы и расстояний между ними.

Метод позволяет проводить глобальную и квазиглобальную оптимизацию для нахождения оптических сил компонентов и их закона перемещения.



В работе [2] положение подвижных компонентов рассчитывалось с помощью специального универсального алгоритма. Для этого генерировалась система уравнений, исходя из необходимости определения осевых расстояний между компонентами, необходимости выдерживания видимого увеличения  $G$  всей системы; необходимости выдерживания афокальности для каждого положения подвижных компонентов; суммы осевых расстояний, что должна оставаться равной заданному значению. Область изменения переменных задавалась в виде гиперболоида и последовательно разбивалась на отдельные части, те части которые не содержали решения отбрасывались. Дополнительно вводились новые поверхности, проходящие через точку решения, что позволяло ускорить процесс отбрасывания частей, не содержащих решения. Уточнение полученных корней осуществлялось с помощью метода Ньютона.

В работе данный метод применялся к расчету трехкомпонентной системы, которая путем разбиения компонента преобразовывалась в четырехкомпонентную.

В работе [24] приводится обзор некоторых методов габаритного синтеза вариообъективов с произвольным числом подвижных компонентов, а также их абберационный синтез в области аббераций третьего и пятого порядков. Исходя из которого, можно сделать вывод, что существует множество разнообразных подходов к решению одной задачи, однако все они не обладают универсальностью.

В работе [25] введены и формализованы условия на структурные и габаритные параметры исходной оптической системы. Используются матричные методы и скобки Гаусса. Исходя из абберационных и габаритных требований, закладываемых на этапе синтеза системы, вводится ряд критериев и целевая функция. В частности, вводится понятие полевой светосилы отдельно взятого компонента, т.е. относительное отверстие, для задания критериев рациональности построения исходной системы. В работе [25] рассматривается возможность проведения синтеза системы в автоматизированном режиме.

В заключение следует отметить, что в настоящее время отсутствует общепринятый и официально-зарегистрированный метод расчета исходных оптических систем с переменным фокусным расстоянием, отсутствует систематизация, рассмотренные методы содержат трудоемкий математический расчет, а также нет возможности заимствования, т.к. методы описываются не в полном объеме (пошагово). Таким образом, актуальной задачей остается нахождение более удобных и простых способов расчета исходной системы с переменным фокусным расстоянием.

### Выводы по главе 1

1. Рассмотрена двухканальная телевизионная ОПИИС, состоящая из разработанного и запатентованного объектива для ближней ИК-области спектра (патент РФ 2690098) и разработанного термостабилизированного объектива видимой и ближней ИК-области спектра. Выявлены достоинства и недостатки двухканальной ОПИИС, предложена одноканальная ОПИИС с объективом переменного фокусного расстояния.

2. Рассмотрены основные этапы проектирования ОСПФР, которые являются общими для любых других оптических систем.

3. Выполнен обзор некоторых существующих ОПФР как отечественных, так и зарубежных.

4. Рассмотрены основные этапы проектирования ОСПФР на примере фирмы *Canon*, которые в общей сложности схожи с этапами проектирования таких систем в России.

5. Рассмотрены методы габаритного синтеза оптических систем. В общей сложности можно отметить, что существующие методы нахождения габаритных размеров рассматриваемой системы являются довольно сложными, поэтому актуальной задачей остается нахождение более удобных и простых способов расчета исходной ОСПФР.

## ГЛАВА 2 ВЫБОР МЕТОДА РАСЧЕТА ИСХОДНОЙ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТИВА С ПЕРЕМЕННЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ

Как отмечалось выше, при проектировании оптических систем с переменным фокусным расстоянием необходимо пройти этапы синтеза, анализа и оптимизации. Если современные программные пакеты для расчета оптических систем поддерживают механизмы анализа и оптимизации, то синтез системы разработчик осуществляет вручную. На этапе синтеза можно взять за аналог какой-либо из существующих объективов переменного фокусного расстояния. Однако, в частности для патентной чистоты, желательно пользоваться определенными методами расчета. Существующие методы расчета панкратических объективов являются достаточно сложными, раздел 1.4. Можно найти более простой метод расчета такого объектива в тонких компонентах, реализовать его в программе по расчету оптических систем, например в *ZEMAX*, с помощью макроса, что сократит время начального этапа проектирования.

Таким образом, выберем метод расчета исходной системы ОПФР, который можно отнести к третьей группе подходов, обозначенных выше.

### 2.1 Математическая модель оптической системы с переменным фокусным расстоянием

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

- выбор структурной схемы объектива с переменным фокусным расстоянием — определение числа и относительного расположения компонентов;
- габаритный синтез объектива с переменным фокусным расстоянием — определение оптических сил, относительных отверстий и законов перемещения компонентов при заданном перепаде фокусных расстояний, диафрагменном числе, габаритах системы и других конструктивных ограничениях;

- абберрационный синтез объектива с переменным фокусным расстоянием — определение конструктивных параметров компонентов вариообъектива, обеспечивающих заданное качество изображения;
- параметрическая оптимизация оптической системы вариообъектива.

Этап габаритного синтеза оптической системы удобнее автоматизировать. Возможности программных пакетов по расчету оптических систем, например *Zemax*, позволяют упростить, автоматизировать и сократить время проведения моделирования с помощью макросов. Программирование на специально разработанном языке *Zemax* расширяет возможности пользователя, позволяя выполнять вычисления в самой программе *Zemax*, например, как показано в работах [26, 27, 45, 51].

Как правило, при габаритном расчете объектива с переменным фокусным расстоянием при заданном перепаде фокусных расстояний задаются оптическими силами компонентов и находят закон их перемещения. Для разработчика более наглядно, задаваясь законом перемещения компонентов, находить их оптические силы. Следует отметить, что в основном из рассмотренных в первой главе объективов с переменным фокусным расстоянием, объективы с кратностью 6...20 отн. ед. состоят из четырех компонентов. Необходимо найти математическую модель трех- или четырехкомпонентного ОПФР.

Существует удобный и простой способ расчета любой оптической системы. Воспользуемся этим способом, чтобы рассчитать панкратическую систему. [28, 42, 44, 47]

Для выбора оптических сил компонентов панкратического объектива применим формулу для расчета хода параксиального луча через систему из  $k$  поверхностей (2.1):

$$\begin{aligned}\alpha_{k+1} &= \alpha_k + h_k \varphi_k \\ h_{k+1} &= h_k - \alpha_{k+1} d_k\end{aligned}\tag{2.1}$$

где  $\alpha_k$  — угол падения параксиального луча на  $k$ -ый компонент;  $h_k$  — высота параксиального луча, падающего на  $k$ -ый компонент;  $\varphi_k$  — оптическая сила

$k$ -ого компонента.

На рисунке 2.1 показан ход луча через четырехкомпонентную оптическую систему.

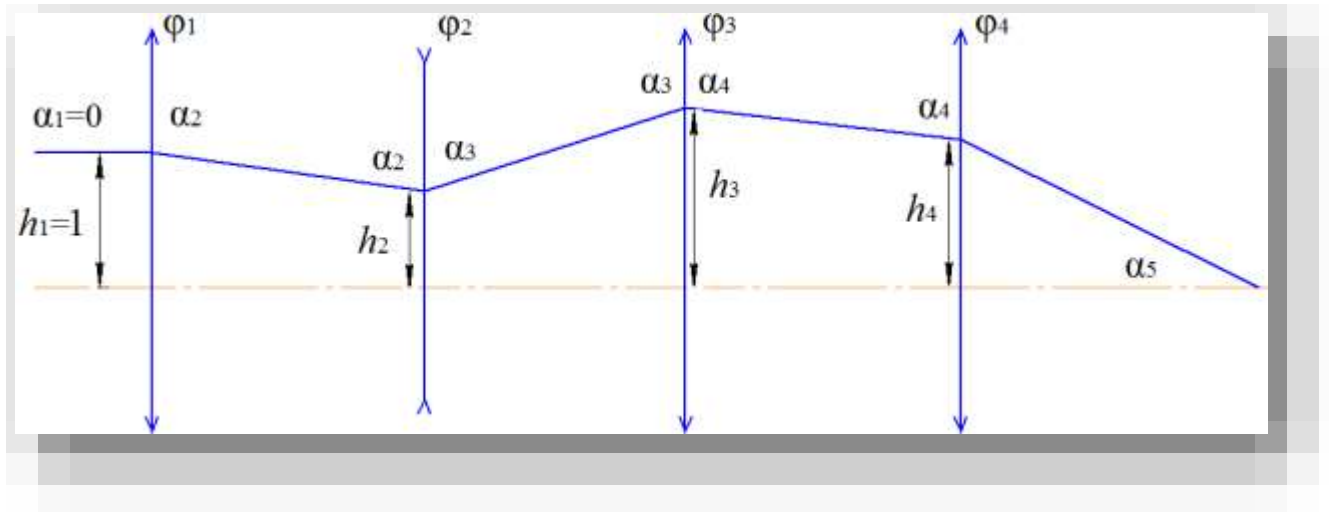


Рисунок 2.1 – К расчету хода параксиального луча через четырехкомпонентную систему

Тогда для панкратической системы оптическая сила системы в первом и во втором крайних состояниях  $\varphi_I$  и  $\varphi_{II}$  соответственно и задние фокальные отрезки  $S'_I$  и  $S'_{II}$  для этих двух состояний имеют вид:

$$\begin{aligned} \varphi_I &= \alpha_{k+1}, \varphi_{II} = \bar{\alpha}_{k+1} \\ S'_I &= h_k / \alpha_{k+1} = h_k / \varphi_I \\ S'_{II} &= \bar{h}_k / \varphi_{II} \end{aligned} \quad (2.2)$$

где  $h_k$  – высота параксиального луча, падающего на  $k$ -ый компонент, в первом состоянии системы;  $\bar{h}_k$  – высота параксиального луча, падающего на  $k$ -ый компонент, во втором состоянии системы.

Из уравнений (2.2) получаем систему (2.3), позволяющую рассчитать панкратический объектив:

$$\begin{cases} \varphi_I = \alpha_{k+1} \\ \varphi_{II} = \bar{\alpha}_{k+1} \\ L_I - L_{II} = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

где  $L_I$  и  $L_{II}$  – длина оптической системы в начальном и конечном состояниях соответственно.

Воспользовавшись уравнениями (2.1) – (2.3), и введя зависимость  $\varphi_3=n \cdot \varphi_2$ , где  $n$  – коэффициент равный, например,  $-0,9$ , получаем систему уравнений (2.4):

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 + \varphi_4 - \varphi_1 \varphi_4 (L - d_4) + \varphi_2 (\varphi_1 d_1 - 1) (\varphi_4 (d_2 + d_3) - 1) + n \varphi_2 d_2 (\varphi_4 d_3 - 1) \times \\ \times ((1 - \varphi_1 d_1) (\varphi_2 - 1 / d_2) + \varphi_1) - \varphi_I = 0, \\ \varphi_1 + \varphi_4 - \varphi_1 \varphi_4 (L - s_4) + \varphi_2 (\varphi_1 \bar{d}_1 - 1) (\varphi_4 (\bar{d}_2 + \bar{d}_3) - 1) + n \varphi_2 \bar{d}_2 (\varphi_4 \bar{d}_3 - 1) \times \\ \times ((1 - \varphi_1 \bar{d}_1) (\varphi_2 - 1 / \bar{d}_2) + \varphi_1) - \varphi_{II} = 0, \\ s_4 = \varphi_{II} \left( 1 - \varphi_1 (\bar{d}_1 + \bar{d}_2 + \bar{d}_3) + \varphi_2 \bar{d}_3 \left( (\varphi_1 \bar{d}_1 - 1) \left( n (1 - \varphi_2 \bar{d}_2) + 1 + \bar{d}_2 / \bar{d}_3 \right) + n \varphi_1 \bar{d}_2 \right) \right), \\ d_4 = \varphi_I \left( 1 - \varphi_1 (d_1 + d_2 + d_3) + \varphi_2 d_3 \left( (\varphi_1 d_1 - 1) \left( n (1 - \varphi_2 d_2) + 1 + d_2 / d_3 \right) + n \varphi_1 d_2 \right) \right), \\ L = \bar{d}_1 + \bar{d}_2 + \bar{d}_3 + s_4, \\ d_2 = L - d_1 - d_3 - d_4 \end{array} \right. \quad (2.4)$$

где  $M = \varphi_{II} / \varphi_I$ ;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  – оптические силы первого, второго, третьего и четвертого компонентов оптической системы соответственно;  $d_1, d_2, d_3$  – расстояния между компонентами в начальном состоянии оптической системы;  $\bar{d}_1, \bar{d}_2, \bar{d}_3$  – расстояния между компонентами в конечном состоянии оптической системы. [28]

Решим полученную систему уравнений (2.4) одним из существующих приближенных методов.

Из конструктивных требований к габаритам системы, следует также уточнить закон движения компонентов и уменьшить световой размер первого компонента. Для этого рассмотрим прохождение крайнего луча через оптическую систему. Примем, что апертурная диафрагма располагается в главной плоскости четвертого компонента. Тогда световой радиус четвертого компонента  $R_4$  равен:

$$R_4 = \frac{s_4}{2 \cdot K}, \quad (2.5)$$

где  $K$  – диафрагменное число оптической системы.

Из построения хода крайнего луча системы в обратном направлении находим световой радиус первого компонента  $R_1$  равным:

$$\begin{aligned}
R_1 &= R_2 + \bar{d}_1 \left[ (y' + R_4 \cdot (1 - s_4 \cdot \varphi_4)) \cdot \frac{1}{s_4} - R_3 \cdot \varphi_3 - R_2 \cdot \varphi_2 \right], \\
R_2 &= R_3 \cdot (1 - \bar{d}_2 \varphi_3) + \frac{\bar{d}_2}{s_4} (y' + R_4 \cdot (1 - s_4 \cdot \varphi_4)), \\
R_3 &= R_4 + \frac{\bar{d}_3}{s_4} (y' + R_4 \cdot (1 - s_4 \cdot \varphi_4))
\end{aligned} \tag{2.5.1}$$

где  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  – световой радиус второго, третьего и четвертого компонентов соответственно,  $y'$  – половина диагонали приемника излучения.

Уточним закон движения компонентов системы, считая, что относительное отверстие второго компонента  $2 \cdot R_2 \cdot \varphi_2 < 0,75$ . Можно принять другое условие – считать, что  $R_1 < 45$  мм.

Тогда зависимость расстояния между первым и вторым компонентами в конечном состоянии системы  $\bar{d}_1$  от светового радиуса  $R_1$  имеет вид:

$$\bar{d}_1 = (R_1 - R_2) / \left[ (y' + R_4 \cdot (1 - s_4 \cdot \varphi_4)) \cdot \frac{1}{s_4} - R_3 \cdot \varphi_3 - R_2 \cdot \varphi_2 \right] \tag{2.5.2}$$

Учитывая формулы (2.5) – (2.5.2), уточним решение уравнения (2.4).

Как было отмечено ранее, большинство работ содержат трудоемкий математический расчет, раздел 1.5, некоторые из которых при аналитическом решении системы уравнений принимают, что оптические силы компонентов панкратического объектива известны, поэтому находят закон перемещения компонентов. Для этого приходится решать системы уравнений шестой степени и выше, что вызывает определенные проблемы [2, 25].

Системы нелинейных уравнений, обычно только с двумя неизвестными, решаются с помощью метода итераций, метода Ньютона, метода скорейшего спуска и некоторых их модификаций. Существуют более эффективные приближенные методы решения системы уравнений с двумя и более неизвестными, которые не так распространены в настоящее время, что является упущением, из них – метод линейной аппроксимации и метод вариации параметров. Решив систему уравнений (2.4) этими методами, выбираем из них

более подходящий – метод вариации параметров. За искомые величины приняли оптические компоненты системы.

## 2.2 Нахождение переменных математической модели оптической системы с переменным фокусным расстоянием методом вариации параметров

В ходе поиска оптимального подхода для решения системы уравнений (2.4) был выбран метод вариации параметров, поскольку метод оказался прост в реализации и быстродейственным.

Рассмотрим подробно данный метод, описанный в литературе [29].

В системе уравнений (2.4) рассмотрим в качестве параметра

$$\varphi_2 = p,$$

получаем первое разрешающее уравнение [29]

$$\delta_1(p) = p - \varphi_2(p) = 0, \quad (2.9)$$

где  $\varphi_2(p)$  – корень уравнения системы (2.4). Введем новое обозначение:

$$u = u(\varphi_2) = \varphi_1 + \varphi_4 - \varphi_1\varphi_4(d_1 + d_2 + d_3) + \varphi_2(\varphi_1d_1 - 1)(\varphi_4(d_2 + d_3) - 1) + \\ + n\varphi_2d_2(\varphi_4d_3 - 1)((1 - \varphi_1d_1)(\varphi_2 - 1/d_2) + \varphi_1) - \varphi_1 = 0, \quad (2.10)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_4$  – корни системы (2.11).

$$\left\{ \begin{array}{l} v = v(\varphi_1, \varphi_4, p) = \varphi_1 + \varphi_4 - \varphi_1\varphi_4(\bar{d}_1 + \bar{d}_2 + \bar{d}_3) + p(\varphi_1\bar{d}_1 - 1)(\varphi_4(\bar{d}_2 + \bar{d}_3) - 1) + \\ + n \cdot p \cdot \bar{d}_2(\varphi_4\bar{d}_3 - 1)((1 - \varphi_1\bar{d}_1)(p - 1/\bar{d}_2) + \varphi_1) - \varphi_1 = 0 \\ w = w(\varphi_1, \varphi_4, p) = -((M - 1)(1/p) + d_2 - d_3(x' \cdot n - 1) + M(\bar{d}_3(y' \cdot n - 1) - \bar{d}_2)) / \\ /((\bar{d}_3M(\bar{d}_1(1 + n + \bar{d}_2/\bar{d}_3) - \bar{y}'n \cdot \bar{d}_2) - d_3(d_1(1 + n + d_2/d_3) + \bar{x}'n \cdot d_2) + (L - s_4)/(\varphi_2(1 - M))) = 0 \end{array} \right. \quad (2.11)$$

где  $x' = d_2p - 1$ ;  $y' = \bar{d}_2p - 1$ ;  $\bar{x}' = 1 - d_1p$ ;  $\bar{y}' = 1 - \bar{d}_1p$ .

Для решения (2.11) вводим второй параметр

$$\varphi_4 = q,$$

так что вторым разрешающим уравнением будет

$$\delta_2(p, q) = q - \varphi_4(p, q) = 0, \quad (2.12)$$

где  $\varphi_4(p, q)$  – корень первого уравнения системы (2.11), а  $\varphi_1$  определим из второго уравнения системы (2.11):



$$\varphi_1 = \frac{\varphi_{II} - \varphi_I + d_4 - s_4 - p(k_2 \cdot \bar{d}_3 \cdot \varphi_{II} - k_1 \cdot d_3 \cdot \varphi_I)}{p(\varphi_I d_3 (k_1 \cdot d_1 + n \cdot d_2) - \varphi_{II} \bar{d}_3 (k_2 \cdot \bar{d}_1 + n \cdot \bar{d}_2)) + (L - s_4) \varphi_{II} - (L - d_4) \varphi_I}, \quad (2.13)$$

где  $k_1 = n(1 - p \cdot d_2) + 1 + d_2 / d_3$ ,  $k_2 = n(1 - p \cdot \bar{d}_2) + 1 + \bar{d}_2 / \bar{d}_3$ .

Корни разрешающих уравнений (2.9) и (2.12) согласно [29] находятся по методу полиномиальной аппроксимации (МПА), а каждое уравнение с одним неизвестным, к которым мы пришли, решаются по методу Ньютона, согласно которому имеем:

$$\varphi_{2_{n+1}}(p) = \varphi_{2_n}(p) - \frac{u(\varphi_{2_n})}{du(\varphi_{2_n})}, \quad (2.14)$$

$$du(\varphi_{2_n}) = (\varphi_1 d_1 - 1)(\varphi_4 (d_2 + d_3) - 1) + n((2\varphi_2 d_2 - 1)(1 - \varphi_1 d_1) + \varphi_1 d_2)(\varphi_4 d_3 - 1)$$

$$\varphi_{4_{n+1}}(p, q) = \varphi_{4_n}(p, q) - \frac{v(\varphi_{4_n})}{dv(\varphi_{4_n})}, \quad (2.15)$$

$$dv(\varphi_{4_n}) = 1 - \varphi_1(L - s_4) + \varphi_2((\varphi_1 \bar{d}_1 - 1)(\bar{d}_2 + \bar{d}_3) + n \bar{d}_2 \bar{d}_3((1 - \varphi_1 \bar{d}_1)(\varphi_2 - 1 / \bar{d}_2) + \varphi_1))$$

Получив все необходимые формулы, переходим к вычислениям. Примем две пробы –  $q=40$  и  $q=20$ , что соответствует фокусному расстоянию четвертого компонента  $f_4=1000/40=25$  мм и  $f_4=1000/20=50$  мм.

При  $q=40$ , задавшись параметром  $p=-16$ , что соответствует фокусному расстоянию второго компонента  $f_2=-1000/16=-62,5$  мм, по формуле (2.13) находим  $\varphi_1$ , а затем по формулам (2.10), (2.14), (2.9) соответствующее значение  $\delta_1(p)$ . Сохраняя  $q=40$  и взяв  $p=-16-(u(\varphi_2)/du(\varphi_2))$  аналогично находим значение  $\delta_1(p)$ , и так продолжая до тех пор, пока не получим, что  $\delta_1(p)=0$ .

Во втором шаге, взяв  $q=20$ , аналогичным путем находим такое  $\varphi_1$  и  $p$ , что  $\delta_1(p)=0$ .

Запомнив такие значения  $\varphi_1$  и  $p$ , при которых  $\delta_1(p)=0$  для  $q=40$ , вычисляем по формуле (2.15) новое значение  $\varphi_4$ , находим невязку  $\delta_2(p, 40)$ . Аналогично при  $q=20$ , вычисляем по формуле (2.15) новое значение  $\varphi_4$  и находим невязку  $\delta_2(p, 20)$ .

Вычисленные пробы  $\delta_2(p, 40)$  и  $\delta_2(p, 20)$  позволяют по методу полиномиальной аппроксимации (2.16) найти более точное значение параметра  $q=q_3$ :

$$q_3 = -(q_1 \bar{\delta}_{22} + q_2 \bar{\delta}_{21}), \bar{\delta}_{21} = \frac{\delta_{21}}{\delta_{22} - \delta_{21}}, \bar{\delta}_{22} = \frac{\delta_{22}}{\delta_{21} - \delta_{22}} \quad (2.16)$$

где  $\delta_{21}=\delta_2(p, 40)$ ,  $\delta_{22}=\delta_2(p, 20)$ ,  $q_1=40$ ,  $q_2=20$ .

Для  $q_3$  находим  $\varphi_4$  по формуле (2.15), и затем значения  $\varphi_1, p$ , при которых  $\delta_1(p)=0$ . По формуле (2.12) находим третью пробу  $\delta_{23}=\delta_2(p, q_3)$ .

Имея три пробы, по формуле (2.17) вычисляем  $q=q_4$ :

$$q_4 = -(q_1 \bar{\delta}_{22} \bar{\delta}_{23} + q_2 \bar{\delta}_{21} \bar{\delta}_{23} + q_3 \bar{\delta}_{21} \bar{\delta}_{22}),$$

$$\bar{\delta}_{21} = \frac{\delta_{21}}{\delta_{22} - \delta_{23}}, \bar{\delta}_{22} = \frac{\delta_{22}}{\delta_{23} - \delta_{21}}, \bar{\delta}_{23} = \frac{\delta_{23}}{\delta_{21} - \delta_{22}} \quad (2.17)$$

и для значения  $q_4$  находим  $\varphi_4$  по формуле (2.15), затем находим  $\varphi_1$  и  $p$ , при которых  $\delta_1(p)=0$ , и по формуле (2.12) находим четвертую пробу  $\delta_{24}=\delta_2(p, q_4)$ .

Полученные значения  $q_3, \delta_{23}$  и  $q_4, \delta_{24}$  позволяют по формуле (2.18) уточнить значение  $q$ .

$$q_5 = -(q_3 \bar{\delta}_{24} + q_4 \bar{\delta}_{23}), \bar{\delta}_{23} = \frac{\delta_{23}}{\delta_{24} - \delta_{23}}, \bar{\delta}_{24} = \frac{\delta_{24}}{\delta_{23} - \delta_{24}} \quad (2.18)$$

Для значения  $q_5$  находим  $\varphi_4$  по формуле (2.15), затем  $\varphi_1$  и  $p$ , при которых  $\delta_1(p)=0$ , по формуле (2.13) находим пятую пробу  $\delta_{25}=\delta_2(p, q_5)$ . Повторяя процесс, находим такое значение  $q$ , при котором  $\delta_1(p)=0$  и  $\delta_2(p, q)=0$ , а следовательно,  $u=0$ ,  $v=0$ ,  $w=0$ . То есть,  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_4$  являются корнями системы уравнений (2.4). Далее уточняем закон движения компонентов и габариты системы, задавая условие  $2 \cdot R_2 \cdot \varphi_2 < 0,75$ , и окончательно находим корни системы уравнений (2.4).

Как отмечалось выше, данный метод поиска корней системы нелинейных уравнений оказался прост в реализации.

Блок-схема поиска корней системы нелинейных уравнений методом вариации параметров приведена на рисунке 2.2.

Красными линиями показан цикл поиска таких значений  $\varphi_1$  и  $p$ , при которых  $\delta_1(p)=0$ , для каждого новых значений  $q$  и  $\delta_2(p, q)$  линии имеют

определенный цвет, толстыми линиями обозначен цикл поиска таких значений  $\varphi_1$ ,  $p$  и  $q$ , при которых  $\delta_2(p,q)=0$ .

На основе этого метода была составлена программа (макрос) в *ZEMAX*, позволяющая быстро найти оптическую систему панкратического объектива, представляемую главными плоскостями.

Макрос написан на макроязыке программы *ZEMAX*.

Для реализации данного макроса в программе *ZEMAX* была создана система, состоящая из четырех параксиальных поверхностей, имеющая две конфигурации.

Положение поверхностей задается исходя из предполагаемой конструкции, так, чтобы сумма расстояний между поверхностями в первой конфигурации была равна сумме расстояний между поверхностями во второй конфигурации. [28, 30]

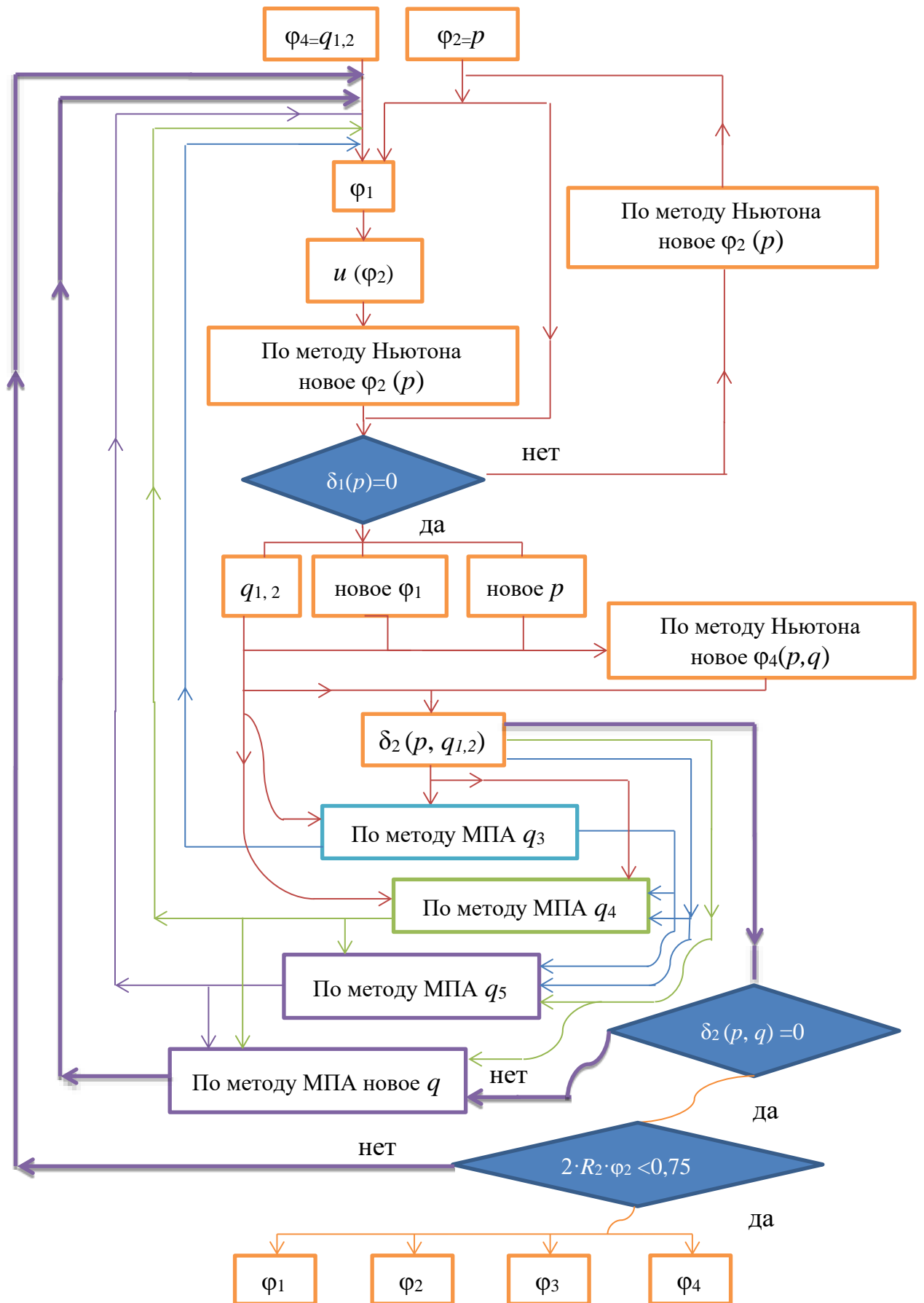
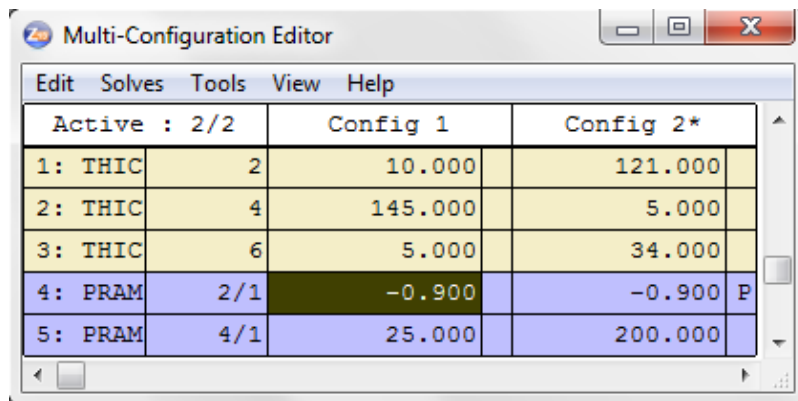


Рисунок 2.2 – Блок-схема поиска корней системы (2.4) методом вариации параметров

В таблице редактора *Multi-Configuration Editor* помимо расстояний между поверхностями задавались коэффициент  $n = -0,9$ , присутствующий в системе уравнений (2.4), фокусные расстояния моделируемого панкратического объектива в двух крайних состояниях (рисунок 2.3). Отрицательный коэффициент  $n = -0,9$ , указывает, что третий компонент имеет положительную оптическую силу. Расстояния, заданные второй строкой колонки *Config 1* и первой строкой колонки *Config 2*, корректируются программой (макросом).



Active : 2/2			Config 1	Config 2*
1: THIC	2	10.000	121.000	
2: THIC	4	145.000	5.000	
3: THIC	6	5.000	34.000	
4: PRAM	2/1	-0.900	-0.900	P
5: PRAM	4/1	25.000	200.000	

Рисунок 2.3 – Таблица редактора *Multi-Configuration Editor*

Приведем текст программы (макроса) с пояснениями. Вначале задаются массивы  $y_0$ ,  $z_0$ ,  $dlt10$ ,  $md1$ .

```

p = 15
declare y0, double, 1, p+1
declare z0, double, 1, p+1
declare dlt10, double, 1, p+1
declare md1, double, 1, p+1
lockwindow (-1)
surp 5,10,0,1
surp 5,0,"paraxial"

```

Далее задается коэффициент  $n$ , указывающий, что оптическая сила третьего компонента в  $n$  раз отличается от оптической силы второго. Операнд *msop* (4, 1) означает присвоение коэффициенту  $n$  величины, указанной в четвертой строке первого столбца таблицы редактора *Multi-Configuration Editor*. Задаются

оптическая сила второго компонента, выраженная через параметр  $y$ , и два любых значения оптической силы четвертого компонента  $z1$  и  $z2$ .

*format* 12.6

$n = mscop(4, 1)$

$x=10$

$y=-16$

$z1=40$

$z2=20$

Вначале задается первое значение параметра  $z$ .

$z=z1$

Из таблицы редактора *Multi-Configuration Editor* данные расстояний между компонентами для первой конфигурации системы, фокусное расстояние которой минимально, присваиваются значениям  $d01$ ,  $d02$ ,  $d03$  с помощью операнда *mscop*.

$d01 = mscop(1,1) * 0.001$

$d02 = mscop(2,1) * 0.001$

$d03 = mscop(3,1) * 0.001$

Для второй конфигурации системы, фокусное расстояние которой имеет максимальное значение, величины расстояний между компонентами будут равны  $d1$ ,  $d2$ ,  $d3$ .

$s1 = mscop(1,2) * 0.001$

$d2 = mscop(2,2) * 0.001$

$d3 = mscop(3,2) * 0.001$

$i=1$

$j=1$

$k=0$

$d1=s1$

$y04 = 0.001 * sdia(9)$

Также в редакторе *Multi-Configuration Editor* в пятой строке указываются минимальное и максимальное фокусное расстояние системы.

$$fmin=1/(m\text{cop}(5,1)*0.001)$$

$$fmax=1/(m\text{cop}(5,2)*0.001)$$

Вводятся две метки *label*. Данная метка указывает то место в тексте программы, к которому возвращается программа после вызова команды *goto*.

*label 2*

*label 3*

Водится команда *goto 1* для ограничения цикла поиска светового радиуса первого компонента *rl*, возвращающая к метке *label 1*

*if i > p then goto 1*

Задается длина системы в крайних состояниях

$$s4=1/fmax*(1-x*(d1+d2+d3)+y*d3*((x*d1-1)*(n*(1-y*d2)+1+d2/d3)+n*x*d2))$$

$$d4=1/fmin*(1-x*(d01+d02+d03)+y*d03*((x*d01-1)*(n*(1-y*d02)+1+d02/d03)+n*x*d02))$$

$$L=d1+d2+d3+s4$$

$$d02=L-d01-d03-d4$$

Далее задаются три уравнения, входящих в систему (2.4).

$$kl1=n*(1-y*d02)+1+d02/d03$$

$$kl2=n*(1-y*d2)+1+d2/d3$$

$$x=(1/fmax-1/fmin+ldelta-y*(kl2*d3/fmax-kl1*d03/fmin))/(y*(d03/fmin*(kl1*d01+n*d02)-d3/fmax*(kl2*d1+n*d2))+(d1+d2+d3)/fmax-(d01+d02+d03)/fmin)$$

$$u=x+z-x*z*(d01+d02+d03)+y*(x*d01-1)*(z*(d02+d03)-1)+n*y*d02*(z*d03-1)*((1-x*d01)*(y-1/d02)+x)-fmin$$

$$v=x+z-x*z*(d1+d2+d3)+y*(x*d1-1)*(z*(d2+d3)-1)+n*y*d2*(z*d3-1)*((1-x*d1)*(y-1/d2)+x)-fmax$$

Задается формула (2.5.1)

$$rl4=s4/(2*aval())$$

Задаются производные двух уравнений, корни которых находятся по методу Ньютона.

$$du=(x*d01-1)*(z*(d02+d03)-1)+(z*d03-1)*n*((2*y*d02-1)*(1-x*d01)+x*d02)$$

$$dv=1-x*(d1+d2+d3)+y*((x*d1-1)*(d2+d3)+n*d2*d3*((1-x*d1)*(y-1/d2)+x))$$

Находятся корни уравнений по методу Ньютона.

$$dlt_y = y + (u/du); \quad dlt_z = z - (v/dv)$$

Определяется первая и вторая невязки.

$$dlt_2 = y - dlt_y$$

$$dlt_1 = z - dlt_z$$

Задается условие, что если вторая невязка больше  $10^{-7}$ , то расчет программы начинается с метки *label 2*, то есть задается цикл, продолжающийся до тех пор, пока вторая невязка  $\delta_2(p)$  не станет меньше  $10^{-7}$ .

*if abso(dlt2) > abso(10e-7)*

*y = y + dlt2*

*goto 2*

*endif*

Затем, после того, как нашлись корни первых двух уравнений, при которых невязка  $\delta_2(p)$  близка нулю, в массив записываются найденные корни и значение первой невязки  $\delta_1(p, q)$ .

*y0(i) = y*

*z0(i) = z*

*dlt10(i) = dlt1*

После этого, задается второе значение параметра  $z$ . Программа возвращается ко второй метке, и снова находятся корни первых двух уравнений, при которых невязка  $\delta_2(p)$  близка нулю. В массив записываются найденные корни и значение первой невязки  $\delta_1(p, q)$ .

*if i == 1*

*z = z2*

*i = i + 1*

*goto 3*

*endif*

Далее по методу полиномиальной аппроксимации вычисляется новое значение параметра  $z$ . Программа возвращается ко второй метке, и снова находятся корни первых двух уравнений, при которых вторая невязка  $\delta_2(p)$



близка нулю. В массив записываются найденные корни и значение первой невязки  $\delta_1(p, q)$ .

```

if i==2
z=-((z0(1)*dlt10(2)/(dlt10(1)-dlt10(2)))+(z0(2)*dlt10(1)/(dlt10(2)-dlt10(1))))
i=i+1
goto 3
endif

```

В массиве *dlt10* теперь имеется три значения параметра *z*. Имея их в своем распоряжении, по методу полиномиальной аппроксимации находим четвертое значение параметра *z*. Снова программа возвращается ко второй метке, и повторяются те же действия.

```

dlt1=dlt10(1)/(dlt10(2)-dlt10(3))
dlt2=dlt10(2)/(dlt10(3)-dlt10(1))
dlt3=dlt10(3)/(dlt10(1)-dlt10(2))
if i==3
z=-((z0(1)*dlt2*dlt3+z0(2)*dlt1*dlt3+z0(3)*dlt1*dlt2))
i=i+1
goto 3
endif

```

Затем задается условие, при котором цикл поиска значения параметра *z* будет повторяться до тех пор, пока первая невязка не будет меньше  $10^{-7}$ .

```

if abso(dlt10(i))>abso(10e-7)
z=-((z0(i-1)*dlt10(i)/(dlt10(i-1)-dlt10(i)))+(z0(i)*dlt10(i-1)/(dlt10(i)-dlt10(i-1))))
i=i+1
goto 3
endif

```

Поиск корней системы уравнений для центрального поля системы завершен. Теперь введем параметры, позволяющие учесть требование к габаритам системы и уточнить закон движения компонентов.

Вычисляется световой радиус первого компонента *rl*.

$$rl3=rl4+(d3/s4)*(y04+(1-s4*z)*rl4)$$

$$rl2=rl3*(1-d2*n*y)+d2/s4*(y04+(1-s4*z)*rl4)$$

$$rl=rl2+d1*((y04+(1-s4*z)*rl4)/s4-y*(rl2+rl3*n))$$

Полученные значения фокусных расстояний компонентов и корректируемые расстояния системы заносятся в массив

$$k=k+1$$

$$vec1(k)=x$$

$$vec2(k)=y$$

$$vec3(k)=z$$

$$vec4(k)=d02$$

$$md1(k)=d1$$

и затем заносятся в окно редактора *Lens Data Editor* с помощью операндов *surp* и *setmcooperand*.

$$surp\ 1,10,1000/x,1$$

$$surp\ 3,10,1000/y,1$$

$$if\ (n!=0)\ then\ surp\ 5,10,1000/(n*y),1$$

$$surp\ 7,10,1000/z,1$$

$$setmcooperand\ 2,1,1000*d02,0$$

$$setmcooperand\ 1,2,1000*d1,0$$

Далее корректируется световой радиус первого компонента изменением расстояния между первым и вторым компонентами конечного состояния оптической системы, программа возвращается к первой метке.

$$if\ (abso(rl)>abso(0.045)) \tag{2.19}$$

$$rl=rl*0.98$$

$$d1=(rl-rl2)/((y04+(1/z-s4)*(rl4*z))/s4-y*(rl2+rl3*n))$$

$$j=j+1$$

$$goto\ 2$$

$$endif$$

Чтобы цикл поиска светового радиуса первого компонента  $rl$  не повторялся бесконечное число раз в случае невыполнения условия (2.19), ставится метка *label 1*.

*label 1*

После этого, полученные корни системы уравнений искомые расстояния выводятся на печать.

*print*

$1000/vec1(k), 1000/vec2(k), 1000/(n \cdot vec2(k)), 1000/vec3(k), 1000 \cdot vec4(k), 1000 \cdot md1(k)$

Затем переходим к расчету трехкомпонентной системы.

Задается условие, которое выполняется, если оптическая сила третьего компонента равна нулю, то есть система становится трехкомпонентной.

*if (n==0)*

*setmcooperand 2, 1, 1000\*(vec4(k)+d03), 0*

*setmcooperand 2, 2, 1000\*(d2+d3), 0*

*setmcooperand 3, 1, 0, 0*

*setmcooperand 3, 2, 0, 0*

Параксиальная поверхность третьего компонента заменяется стандартной поверхностью.

*surp 5, 0, "standard"*

*endif*

Данный макрос позволяет рассчитать трех- и четырехкомпонентную оптические системы, представляемые параксиальными линзами (в программе *Zemax*) или главными плоскостями. Однако, при необходимости с помощью данной методики можно рассчитать систему с бóльшим количеством компонентов. Но, как правило, на начальных этапах достаточно рассчитать четырехкомпонентную систему с переменным фокусным расстоянием и далее в процессе проектирования разбивать их, увеличивая количество компонентов. В четырехкомпонентной оптической системе второй и третий компоненты в зависимости от задания могут быть как отрицательными, так и иметь разные знаки оптических сил. Знак третьего компонента определяет коэффициент  $n$

системы уравнений (2.4). Для автоматического нахождения заднего отрезка полученной системы в таблице *Lens Data Editor*, в соответствующей ячейке *Thickness*, задается тип *Marginal Ray Height* и вручную заменяется типом *Fixed* после завершения работы макроса. На рисунке 2.4 показано окно программы *Zemax* после вызова макроса.

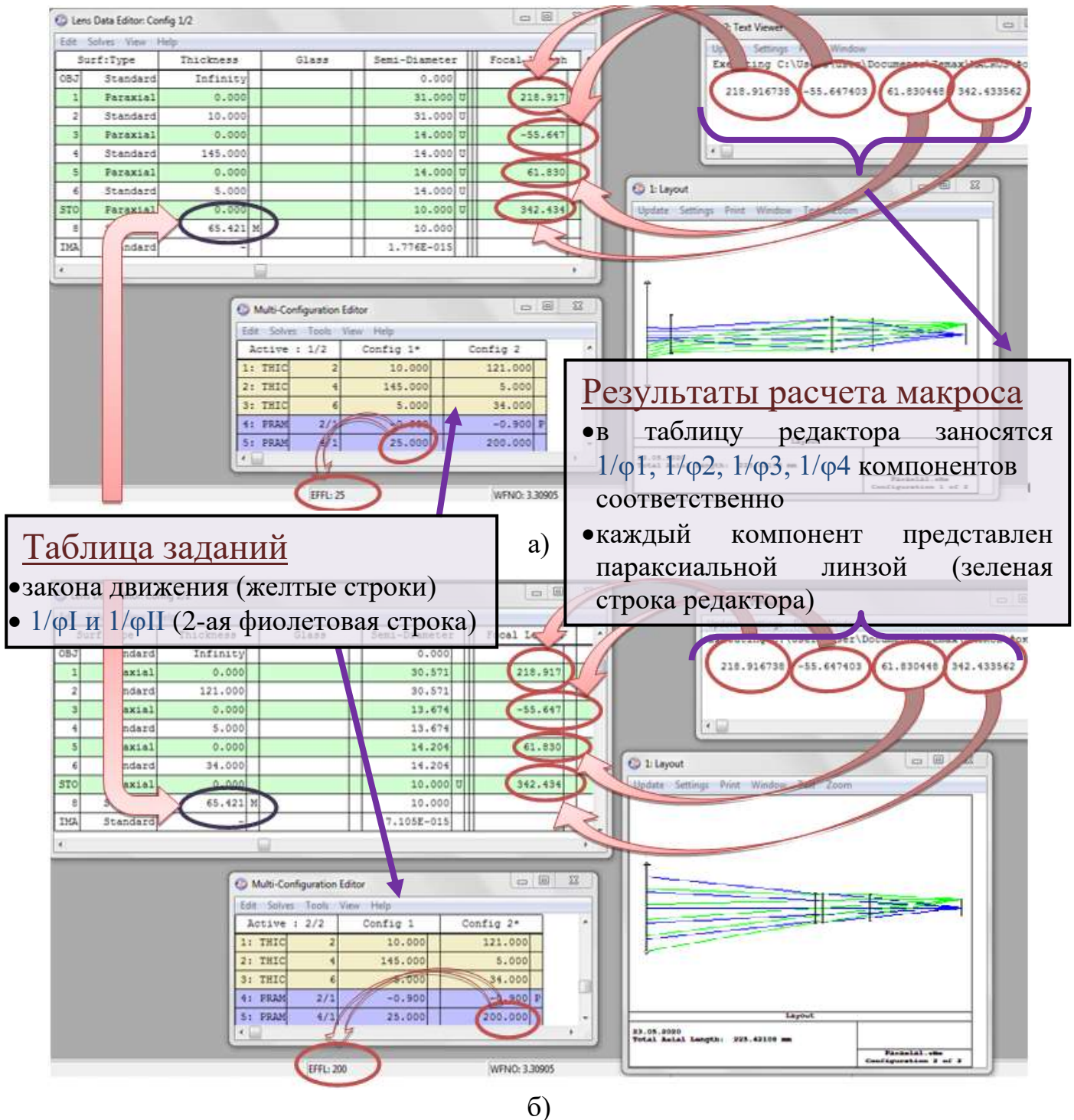


Рисунок 2.4 – Окно программы *Zemax*: а) исходная конфигурация оптической системы; б) конечная конфигурация оптической системы

Окно *Text Viewer*, в котором представлены рассчитанные значения корней системы уравнения (2.4), открывается после завершения работы макроса.

Из рисунка 2.4 видно, что после завершения работы макроса, в соответствующие ячейки *Focal Length* строки *Paraxial* автоматически заносятся рассчитанные корни системы уравнений (2.4). Фокусное расстояние всей системы в каждом из двух крайних состояний стало таким же, как и соответствующие заданные значения в таблице *Multi-Configuration Editor*, задний отрезок системы в двух крайних состояниях (обведен синим маркером) имеет одинаковую величину, общая длина системы одинакова для двух конфигураций. Это означает, что макрос по расчету оптических сил компонентов объектива с переменным фокусным расстоянием работает верно.

### 2.3 Оптическая система, полученная методом вариации параметров. Методика расчета объектива с переменным фокусным расстоянием

Рассмотрим изменение данных значений при изменении закона движения на примере объектива с переменным фокусным расстоянием и кратностью  $10^{\times}$ .

В таблице 2.1 приводится изменение закона движения и связанное с этим изменение значений фокусных расстояний компонентов системы. Значения в таблице 2.1 округлены до целых чисел.

Таблица 2.1 – Расчетные значения исходных синтезированных систем

№	$d_1$ , мм	$d_2$ , мм	$d_3$ , мм	$\bar{d}_1$ , мм	$\bar{d}_2$ , мм	$\bar{d}_3$ , мм	$f'_1$ , мм	$f'_2$ , мм	$f'_3$ , мм	$f'_4$ , мм	$T$ , мм
1	15	150	25	157	10	23	220	-49	55	252	230
2	15	145	30	152	10	28	213	-48	53	271	226
3	15	140	35	147	10	33	206	-46	51	305	220
4	15	135	40	142	10	38	198	-44	49	380	215
5	15	130	45	137	10	43	191	-42	47	696	208
6	15	125	50	132	10	48	184	-41	45	-654	201
7	15	120	55	127	10	53	176	-39	43	-47	193
8	20	120	50	127	13	50	176	-38	42	-62	196
9	25	120	45	127	13	50	180	-37	41	-97	200
10	30	120	40	127	18	45	178	-35	39	-61	202
11	35	120	35	127	18	45	182	-34	37	-64	207
12	35	125	30	127	18	45	190	-34	38	-89	214

Из формулы (2.4) следует, что на величину оптических сил каждого из компонентов влияет выбранный закон движения этих компонентов. Отметим что общая длина системы  $T$ , мм, также зависит от выбранного закона движения компонентов.

Представим графически полученные зависимости фокусных расстояний компонентов от закона их движения, рисунок 2.5.

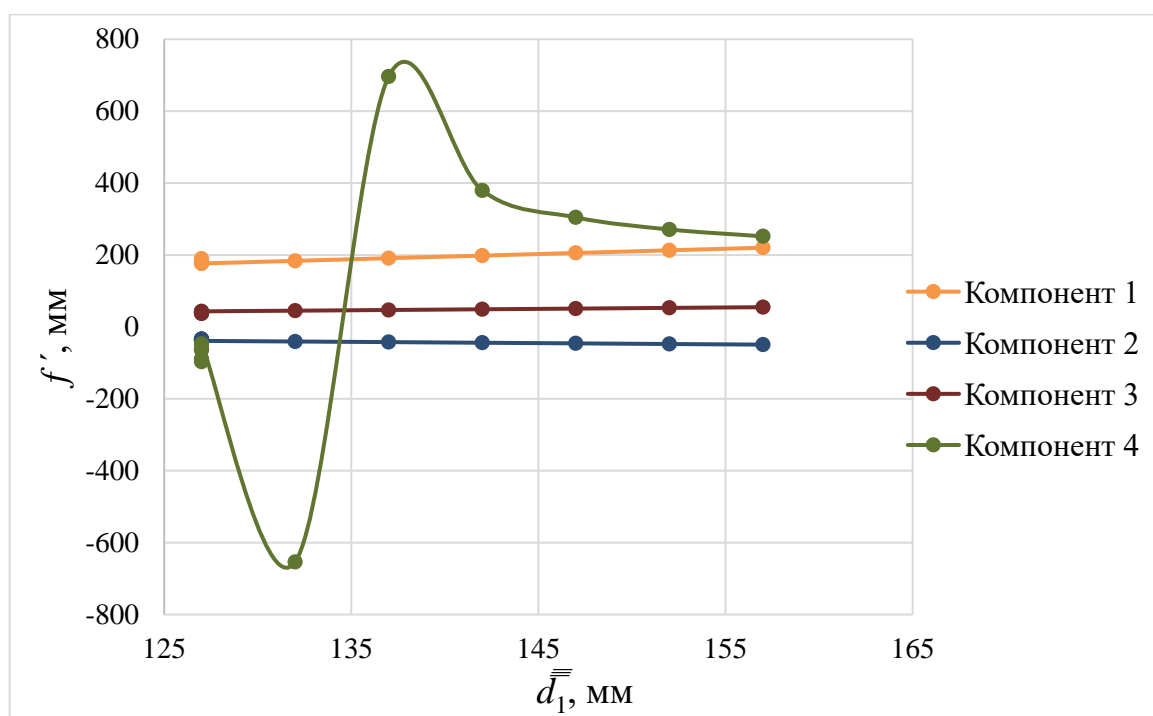


Рисунок 2.5 – Изменение фокусного расстояния компонентов в зависимости от изменения закона движения системы с кратностью  $10^x$

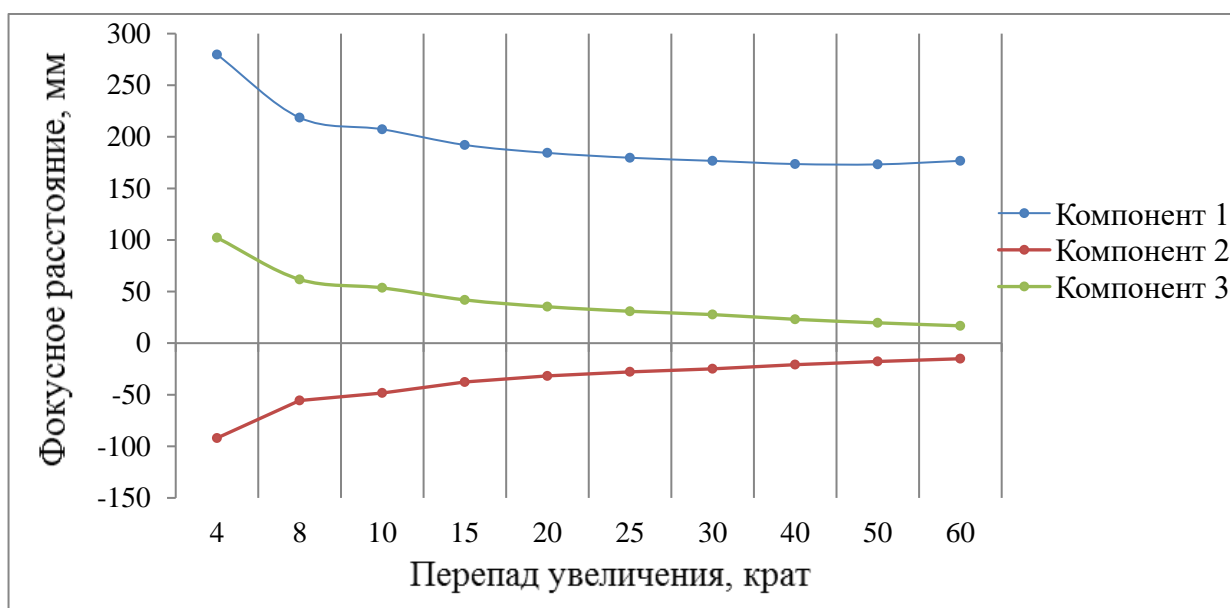
Как видно из графика нелинейное изменение значений фокусного расстояния при изменении закона движения второго компонента только у четвертого компонента.

Рассчитаем, какие фокусные расстояния компонентов системы для центра поля зрения требуются при различных перепадах увеличения, если расстояния между компонентами для первой конфигурации:  $d_1=10$  мм,  $d_2=145$  мм,  $d_3=5$  мм; для второй конфигурации:  $d_{01}=120$  мм,  $d_{02}=5$  мм,  $d_{03}=35$  мм (таблица 2.2). Третий компонент выбран положительным, т.е. знаки компонентов оптической системы выбраны как «+», «-», «+», «+».

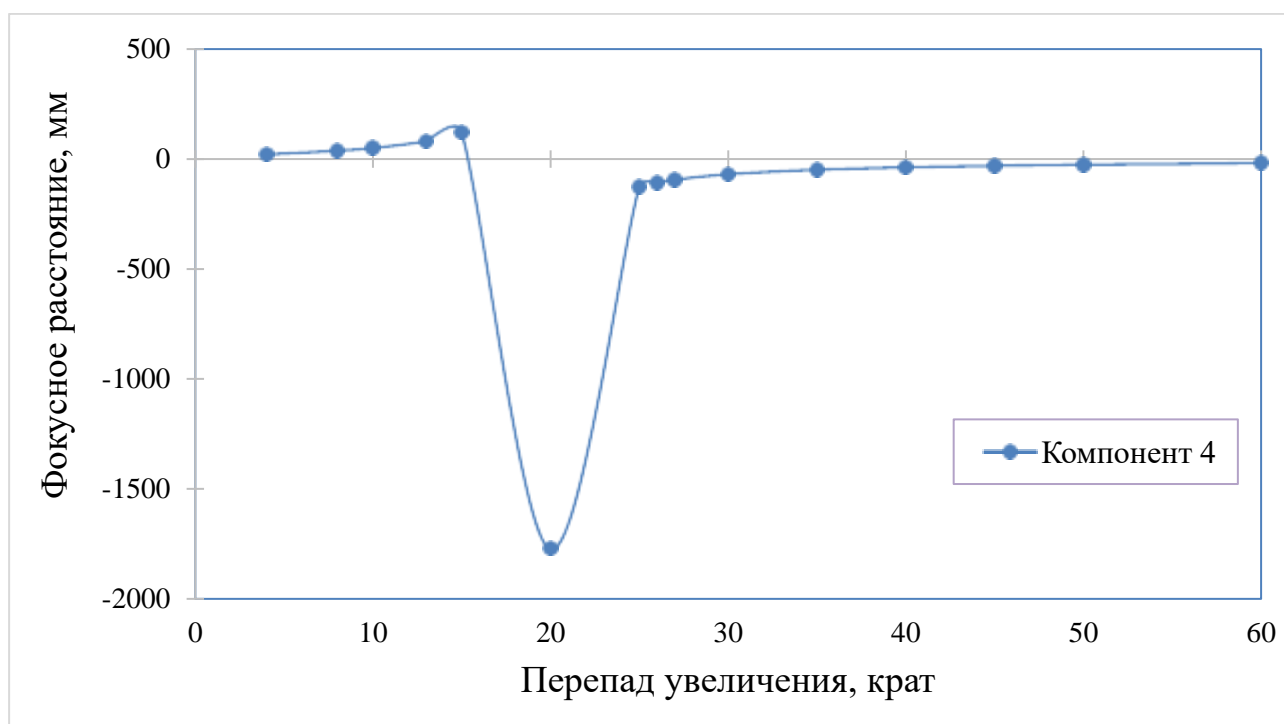
Таблица 2.2 – Фокусные расстояния компонентов (со знаками «+», «-», «+», «+») исходных синтезированных систем различной кратности

№.	$M$ , отн. ед	$f'_1$ , мм	$f'_2$ , мм	$f'_3$ , мм	$f'_4$ , мм
1	4	279,7	-91,95	102,2	21,7
2	8	218,6	-55,6	61,8	38,7
3	10	207,3	-48,25	53,6	50,95
4	20	184,4	-31,8	35,3	-1769,6
5	30	176,7	-24,9	27,7	-67,8
6	40	173,6	-20,8	23,1	-36,3
7	50	173,25	-17,7	19,7	-24,4
8	60	176,7	-15,1	16,8	-17,2

Представим графически полученные результаты, рисунок 2.6.



а)



б)

Рисунок 2.6 – График зависимости фокусного расстояния компонентов от перепада увеличения: а) для первых трех компонентов; б) для четвертого компонента

Из рисунка 2.6, а, видно, что с увеличением кратности при заданном законе перемещения, оптическая сила второго и третьего компонентов увеличивается, первого – уменьшается, с 15 крат их оптические силы линейно изменяются. Оптическая сила четвертого компонента (рисунок 2.6, б) изменяется нелинейно: начиная с 15 крат, оптическая сила четвертого компонента меняет свой знак на противоположный и начинает увеличиваться, до этого оптическая сила уменьшается.

При перепаде увеличения свыше  $20\times$  диаметр первой линзы будет более 80 см при заданном законе перемещения компонентов.

Если знаки компонентов оптической системы выбраны как «+», «-», «-», «+», т.е. третий компонент системы выбран отрицательным, а закон перемещения компонентов выбран для первой конфигурации:  $d_1=10$  мм,  $d_2=100$  мм,  $d_3=40$  мм; для второй конфигурации:  $d_{01}=120$  мм,  $d_{02}=20$  мм,



$d_{03}=10$  мм, получим следующие значения фокусных расстояний компонентов (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Фокусные расстояния компонентов (со знаками «+», «-», «-», «+») исходных синтезированных систем различной кратности

№	$M$ , отн. ед.	$f'_1$ , мм	$f'_2$ , мм	$f'_3$ , мм	$f'_4$ , мм
1	4	229,2	-106,6	-118,5	17,8
2	8	183,4	-69,5	-77,3	22,9
3	10	174,8	-61,96	-68,84	24,6
4	15	163,1	-51,1	-56,7	27,8
5	20	156,9	-44,95	-49,95	30,0
6	25	152,95	-40,9	-45,4	31,7
7	30	150,2	-37,9	-42,1	33,0
8	40	146,4	-33,8	-37,6	35,0
9	50	144	-31	-34,5	36,5
10	60	142,2	-28,9	-32,1	37,6

Представим графически полученные результаты, рисунок 2.7.

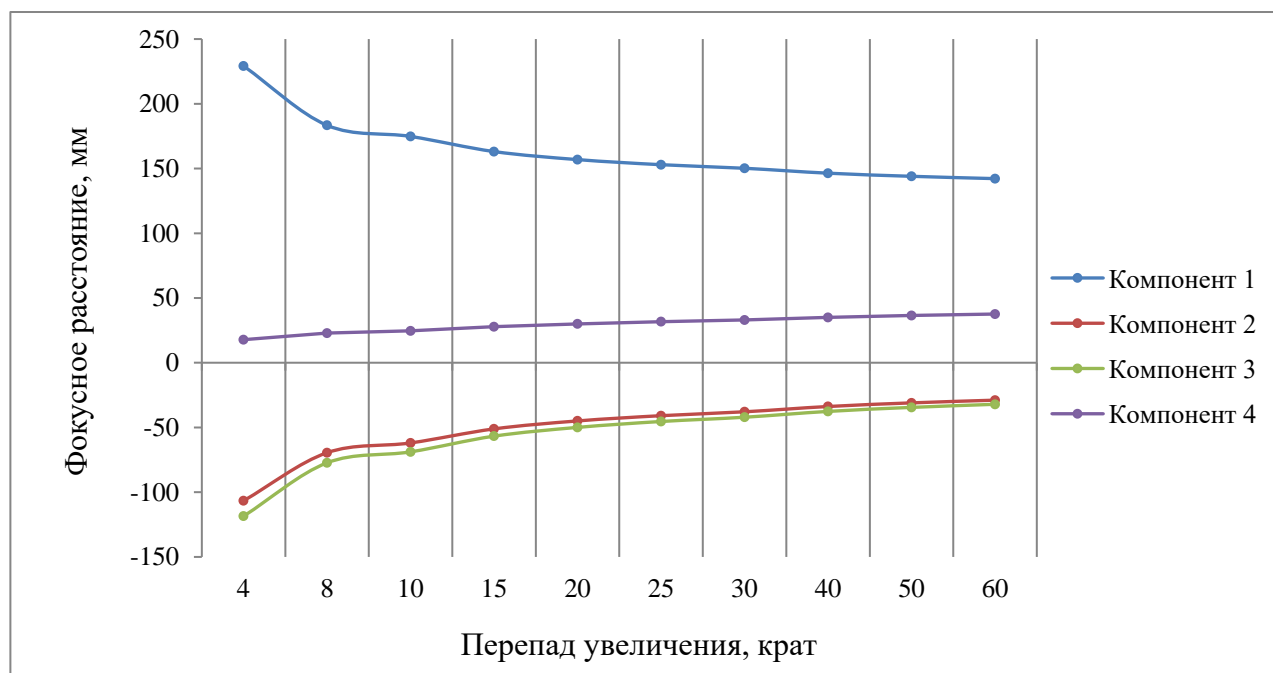


Рисунок 2.7 – График зависимости фокусного расстояния компонентов от перепада увеличения

Из рисунка 2.7 видно, что с увеличением кратности при заданном законе перемещения, оптическая сила второго и третьего компонентов увеличивается,

первого и четвертого – уменьшается. Начиная с 15 крат, оптическая сила компонентов системы изменяется линейно.

При перепаде увеличения свыше  $20\times$  диаметр первой линзы будет более 80 см для заданного закона перемещения компонентов.

Две рассмотренные системы имеют примерно одинаковую закономерность. Система со знаками компонентов «+», «-», «-», «+» обладает преимуществом за счет линейного изменения оптической силы компонентов системы, а также габаритные размеры такой системы меньше системы со знаками компонентов «+», «-», «+», «+». Таким образом, учитывая специфику расчета объектива с переменным фокусным расстоянием и имея в распоряжении полученный макрос, можно составить примерную методику расчета объектива с переменным фокусным расстоянием, в основу которой положена программа по расчету оптических сил компонентов объектива с переменным фокусным расстоянием.

На рисунке 2.8 представлена схема данной методики.

Как было показано прежде, методика расчета любой оптической системы включает три этапа: синтез, анализ и оптимизацию.

Этап синтеза будет осуществляться с помощью полученного макроса по расчету оптических сил компонентов объектива с переменным фокусным расстоянием для программы *Zemax*, в основу которого положен метод вариации параметров.

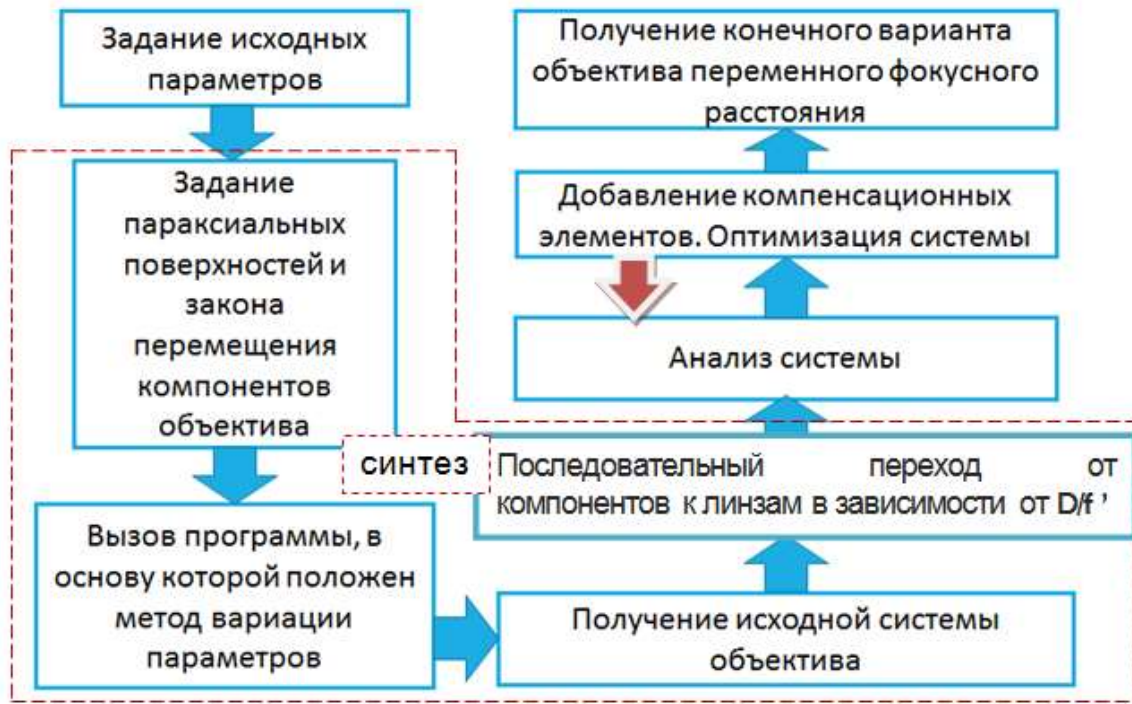


Рисунок 2.8 – Предлагаемая методика расчета объектива с переменным фокусным расстоянием

По завершении работы макроса будем иметь объектив, представленный главными плоскостями с уточненным законом перемещения компонентов и исходными габаритами. Перед началом работы макроса было задано центральное и крайнее поля. После получения исходной системы, необходимо задать промежуточные поля для дальнейшего расчета системы. Далее будем последовательно осуществлять переход от параксиальных компонентов к стандартным линзам, учитывая относительное отверстие компонентов, заменяя главные плоскости компонентов линзами конечной толщины с параметром среды *Model*. Следует отметить, что при относительном отверстии компонента  $D/f' < 0,7$ , он заменяется одной линзой или склейкой, при относительном отверстии компонента  $D/f' > 1$ , оптимальной заменой служат три одиночных линзы. [30]

На этапах анализа и оптимизации, которые могут многократно повторяться, будем усложнять систему, добавляя коррекционные элементы, переходя из среды *Model* к реальным стеклам, и оптимизировать в программе *ZEMAX*.

## Выводы по главе 2

1. Предложена математическая модель для габаритного синтеза трех- и четырехкомпонентной ОСПФР в параксиальной области, у которой общая длина остается постоянной не зависимо от положения компонентов.

2. Рассмотрена методика расчета четырехкомпонентной ОСПФР в параксиальной области, в основу которой положен метод вариации параметров

3. Составлен макрос для расчета ОСПФР, в основу которой положен метод вариации параметров, пригодный для габаритного расчета как четырёхкомпонентной ОС, так и для трехкомпонентной.

4. Преимуществом использования данного макроса является возможность получения исходной ОС, представляемой главными плоскостями, в программе *Zemax*, задавая закон движения компонентов и любой перепад увеличения, что удобно для разработчика на этапе синтеза исходной оптической системы.

5. Предложена примерная методика расчета ОПФР, в основу которой положена программа по расчету оптических сил компонентов такого объектива.

6. По данной методике осуществляется последовательный переход от параксиальных поверхностей к стандартным и, учитывая относительное отверстие компонентов, главные плоскости заменяются линзами конечной толщины.

7. При относительном отверстии компонента, представленного параксиальной поверхностью,  $D/f' < 0,7$ , он заменяется одной линзой или склейкой, при относительном отверстии компонента  $D/f' > 1$ , оптимальной заменой служат три одиночных линзы.

### ГЛАВА 3 ОБЪЕКТИВ С ПЕРЕМЕННЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ ДЛЯ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ КАМЕРЫ ОПИИС

Оптическая система для телевизионной камеры высокой четкости должна иметь характеристики, близкие к дифракционному пределу, так как пятно рассеяния, формируемое этой системой от точечного источника света, должно быть не больше пикселя телевизионной камеры.

Исходя из предлагаемой методики (раздел 2.3), спроектируем объектив с переменным фокусным расстоянием, ограничиваясь несколькими линзами с асферической поверхностью, также будем использовать стекла отечественных марок, желательно, чтобы количество линз в оптической системе было как можно меньше, поскольку это влияет на светопропускание оптической системы. Проектирование объектива с переменным фокусным расстоянием будем осуществлять для матрицы *SONY*. Матрица (КМОП-сенсор) обладает высокой чувствительностью и широким динамическим диапазоном, а также высокой кадровой частотой и цифровым выходным сигналом.

Таблица 3.1 – Характеристики матрицы *SONY IMX174LLJ-C*

Формат, мм	Размер пикселя, мкм	Оптический формат	Частота кадров, Гц	Тип затвора	Корпус
1920 x 1200	5,86 x 5,86	1/1,2"	164,5	Кадровый	118-pins <i>LGA</i>

График спектральной чувствительности матрицы *SONY* приведен на рисунке 3.1.

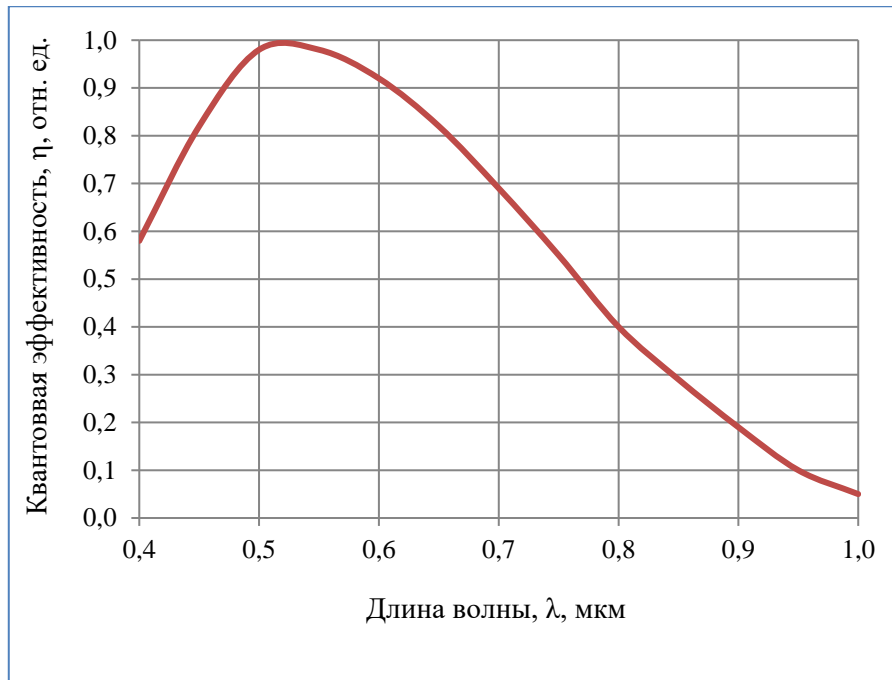


Рисунок 3.1 – Спектральная чувствительность матрицы *SONY IMX174LLJ-C*

Максимальное фокусное расстояние системы  $f'_{min}$  выбирается с учетом желаемого поля зрения и размера диагонали выбранной матрицы.

Максимальное фокусное расстояние системы  $f'_{max}$  выберем с учетом предельного угла разрешающей способности  $\beta$  (3.1)

$$\beta = \frac{2a}{f'_{max}}, \quad (3.1)$$

где  $a$  – размер пикселя матрицы *SONY*.

Предельная дальность видимости прибора  $L_i$  определяется формулой (3.2) [42]:

$$L_i = \frac{A}{\beta \cdot N_{i0,5}} = \frac{A \cdot f'_{max}}{2a \cdot N_{i0,5}}, \quad (3.2)$$

где  $A$  – размер объекта,  $N_{i0,5}$  – величина, определяемая критерием Джонсона.

Учитывая формулу (3.2), спроектируем несколько вариантов объектива с переменным фокусным расстоянием – восьми- и двадцатикратный; минимальное и максимальное фокусные расстояния объективов соответственно для восьмикратного выберем  $f'=25\dots200$  мм, для двадцатикратного в первом случае выберем  $f'=15\dots300$  мм, во втором –  $f'=17\dots350$  мм.

### 3.1 Восьмикратный объектив переменного фокусного расстояния с одним отрицательным компонентом

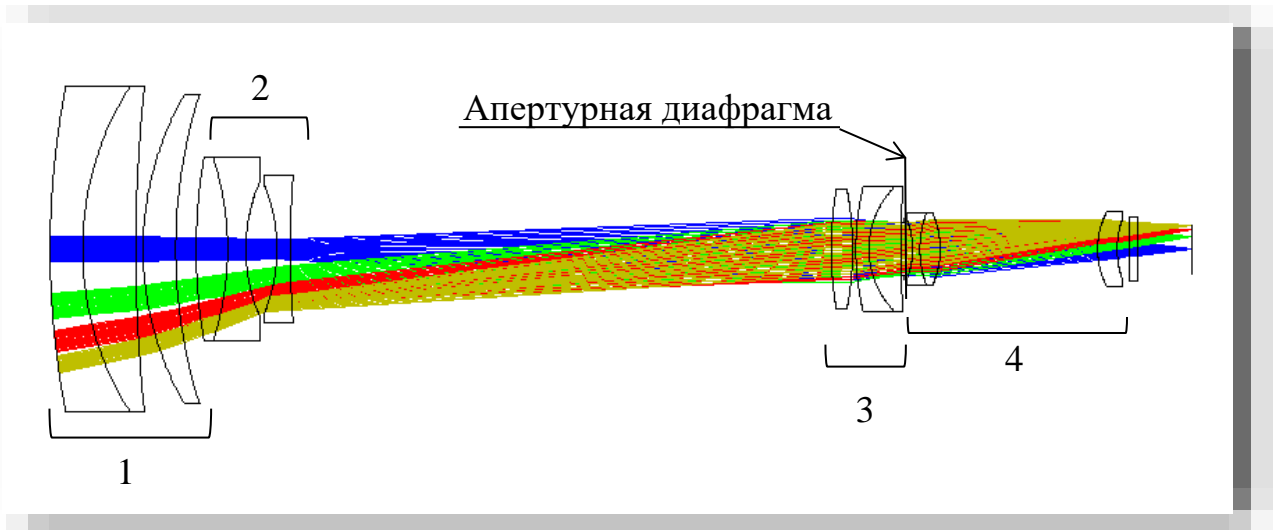
В ходе проектирования была получена оптическая система с перепадом фокусных расстояний  $f'=25\dots 200$  мм, т.е. 8 крат, и относительным отверстием  $D/f'=1:4$ . Относительное отверстие нежелательно брать меньше, поскольку необходимо обеспечить требуемое разрешение. Из конструктивных требований заданы следующие габариты оптической системы: общая длина системы не превышает 280 мм, диаметр первой линзы не более 80 мм.

Апертурная диафрагма размещена перед неподвижным компонентом.

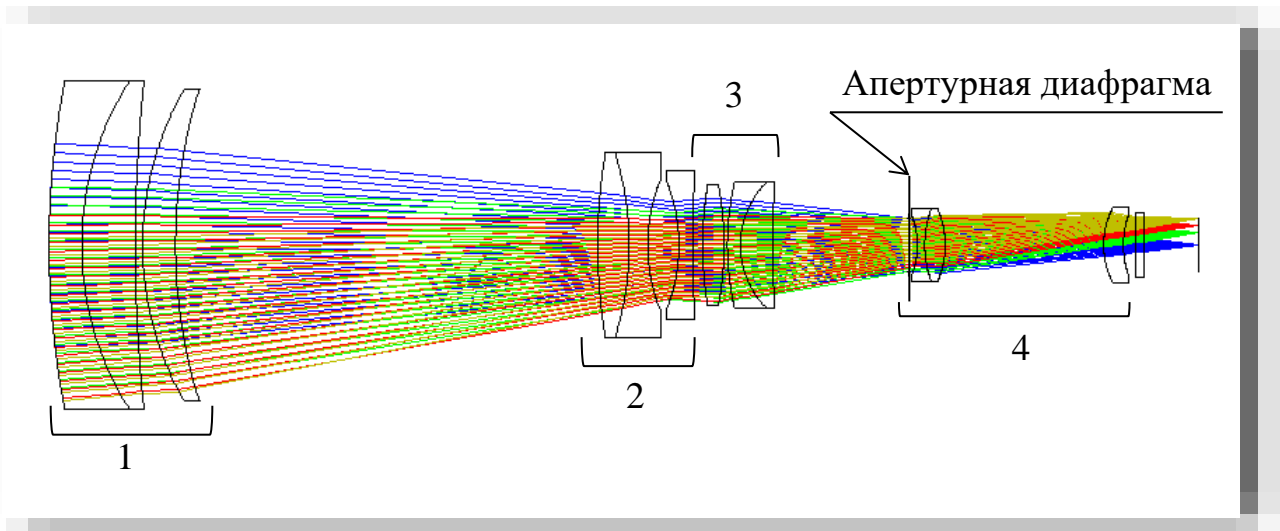
Проектирование объектива с переменным фокусным расстоянием осуществлялось в программе *Zemax* для матрицы *SONY*.

Полученная оптическая система с переменным фокусным расстоянием рассчитывалась для длин волн  $\lambda=0,600\dots 0,800$  мкм. Поле зрения объектива с переменным фокусным расстоянием составило  $2\omega=3,7^\circ\dots 29,1^\circ$ . На рисунке 3.2 (а) показана конфигурация системы для поля зрения  $2\omega=29,1^\circ$  и фокусного расстояния  $f'=25$  мм, на рисунке 3.2 (б) конфигурация системы для поля  $2\omega=3,7^\circ$  и фокусного расстояния  $f'=200$  мм. Система состоит из первого, третьего и четвертого положительного компонента и второго отрицательного. Вторая линза первого компонента оптической системы имеет асферическую поверхность, обращенную к первой линзе. Всего в системе имеется 12 оптических деталей не считая светофильтра. Второй и третий компоненты являются подвижными.

Движение компонентов осуществляется навстречу друг другу.



а)



б)

Рисунок 3.2 – Четырехкомпонентный объектив с переменным фокусным расстоянием, имеющий один отрицательный компонент: а) исходная конфигурация оптической системы  $f^* = 25$  мм; б) конечная конфигурация оптической системы  $f^* = 200$  мм

Закон движения второго и третьего компонентов показан на рисунке 3.3.

Элементом, формирующим оптическую силу компонента, для первого, второго и четвертого компонентов служат вторые линзы, для третьего компонента – первая линза. Компенсационными элементами для первого, второго и четвертого компонентов служат первые линзы, третьего компонента – вторая линза.



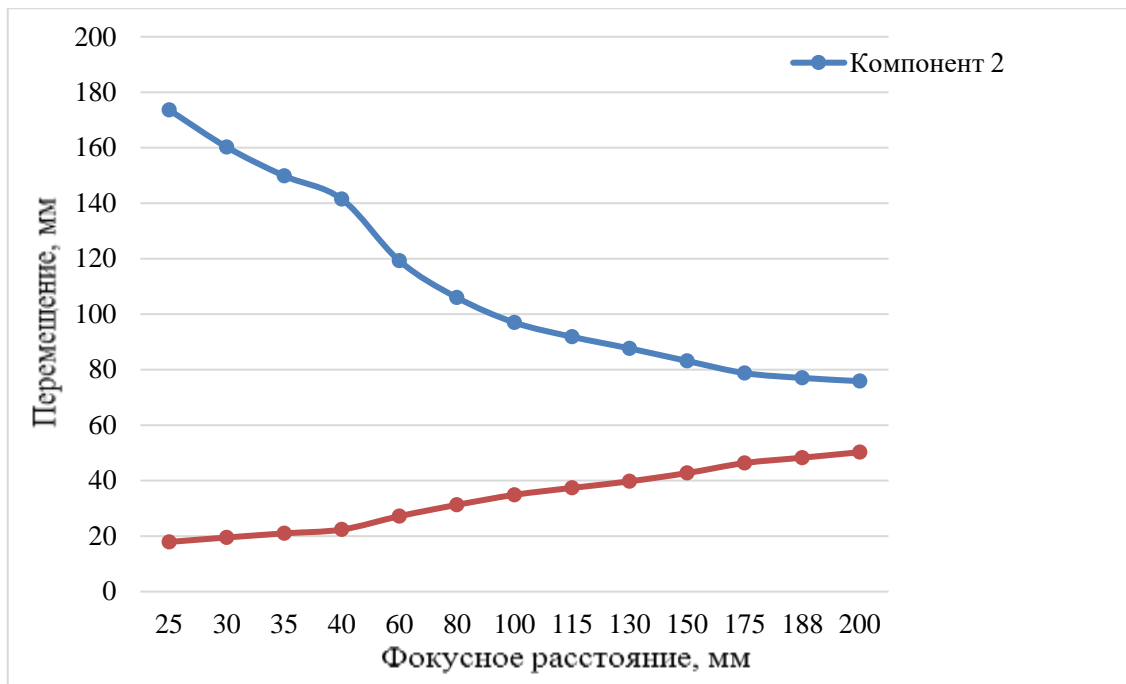
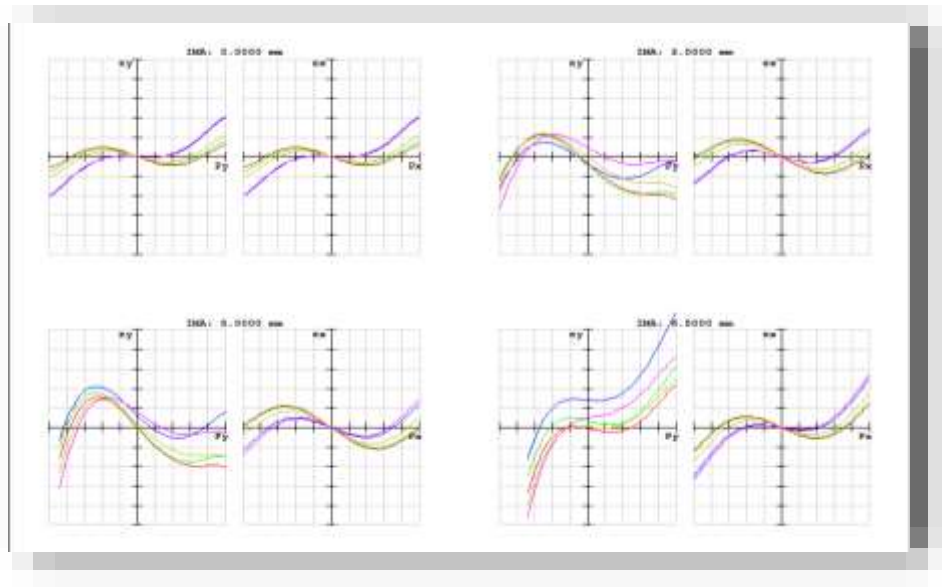


Рисунок 3.3 – График перемещения второго и третьего компонентов

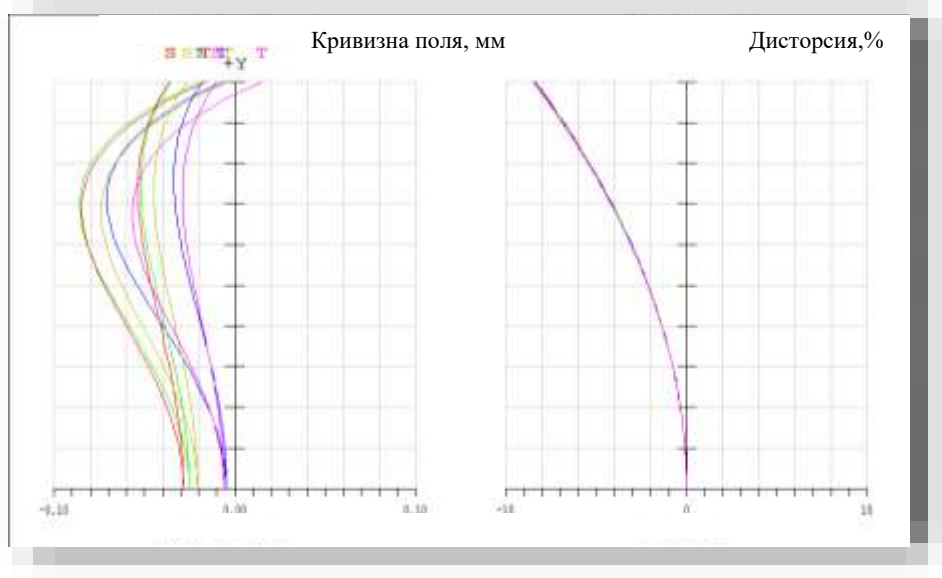
В зависимости от конфигурации aberrации системы изменяются. В начальном состоянии системы первая линза первого компонента устраняет хроматические aberrации, сферическая aberrация отсутствует, кома незначительна. Первый компонент имеет большую положительную дисторсию, полевые aberrации малы. Второй компонент имеет неустраненную положительную дисторсию. Aberrации широкого пучка, хроматические aberrации и астигматизм, кривизна поля минимальные. Третий компонент имеет незначительные хроматические aberrации. Остальные aberrации не устранены. Четвертый компонент имеет малые хроматические, полевые aberrации и aberrации широкого пучка.

Система в начальном состоянии имеет неустраненную положительную дисторсию (8,5%, рисунок 3.4 (б)), незначительные сферическую aberrацию, астигматизм и кривизну поля (от -0,085 мм, для длины волны 0,65 мкм и для координаты поля (0; 0,7) в сагиттальной плоскости, до 0,015 мм, для длины волны 0,80 мкм и для координаты поля (0; 1) в сагиттальной плоскости, рисунок 3.4 (а), (б)).

В конечном состоянии системы, первый компонент имеет незначительные хроматические aberrации, выросли сферическая aberrация и кома. Полевые aberrации стали незначительны. Второй и третий компоненты имеют малые хроматические aberrации. Aberrации широкого пучка и полевые aberrации второго и третьего компонентов противоположны по знаку и частично компенсируют друг друга.



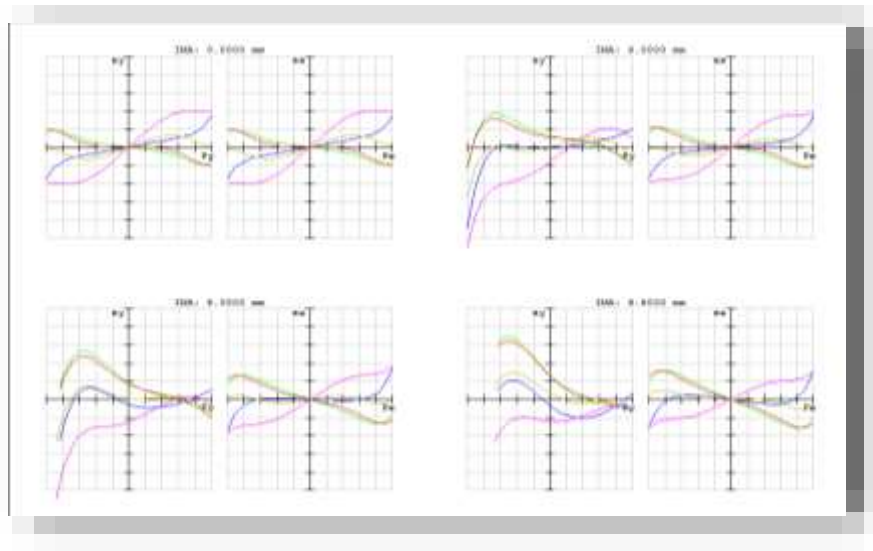
а)



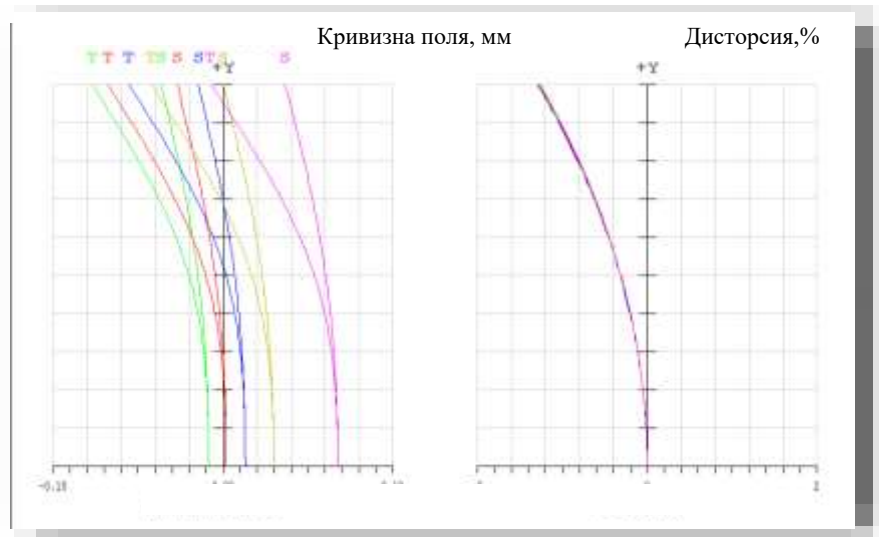
б)

Рисунок 3.4 – а) графики поперечных aberrаций системы; б) графики кривизны поля и дисторсии соответственно для исходной конфигурации системы

Система в конечном состоянии имеет незначительные сферическую aberrацию, астигматизм и кривизну поля (от  $-0,088$  мм для длины волны  $0,65$  мкм и для координаты поля  $(0; 1)$  в меридиональной плоскости до  $0,068$  мм для длины волны  $0,8$  мкм и для координаты поля  $(0; 0)$  в сагиттальной плоскости, рисунок 3.5 (а), (б)) и незначительную положительную дисторсию ( $1,27\%$ , рисунок 3.5 (б)).



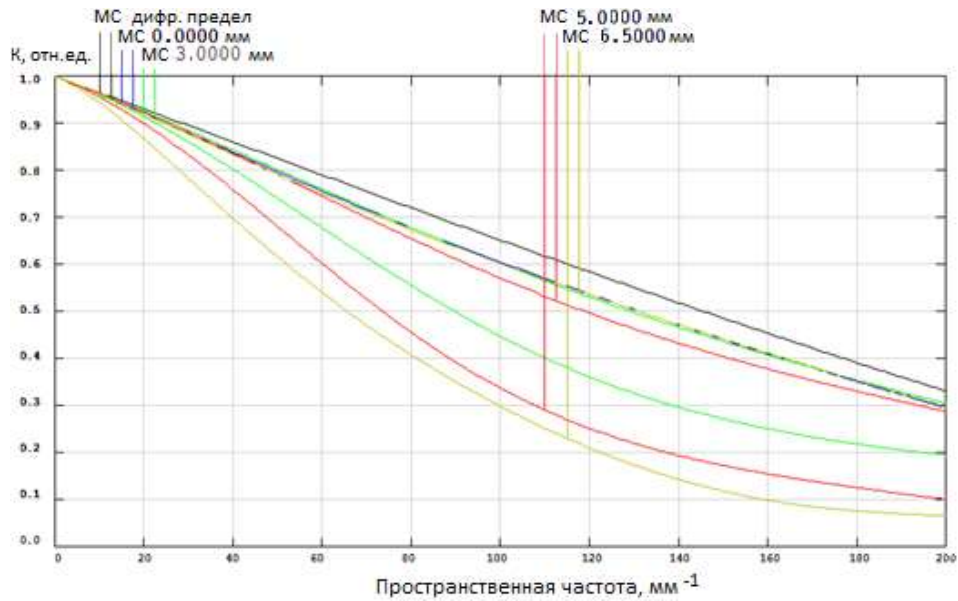
а)



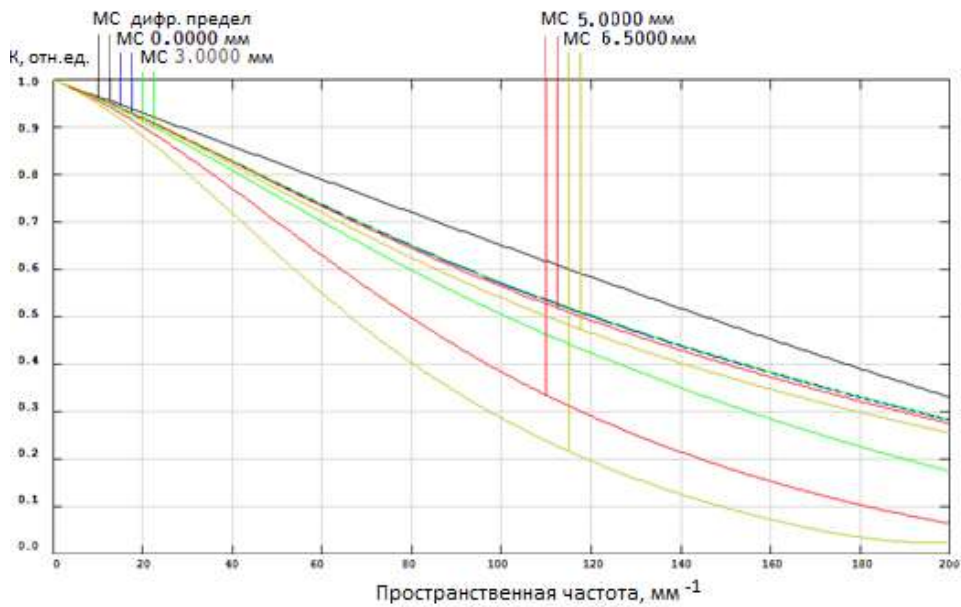
б)

Рисунок 3.5 – а) графики поперечных aberrаций системы; б) графики кривизны поля и дисторсии соответственно для конечной конфигурации системы

На рисунке 3.6 (а) представлен график частотно-контрастной характеристики для заданных полей зрения исходной конфигурации системы, на рисунке 3.6 (б) для конечного состояния системы. Крайнее поле, на графике кривая изображена желтым цветом, задано с запасом. Как видно из рисунка, для осевого пучка лучей частотно-контрастная характеристика близка к идеальной.



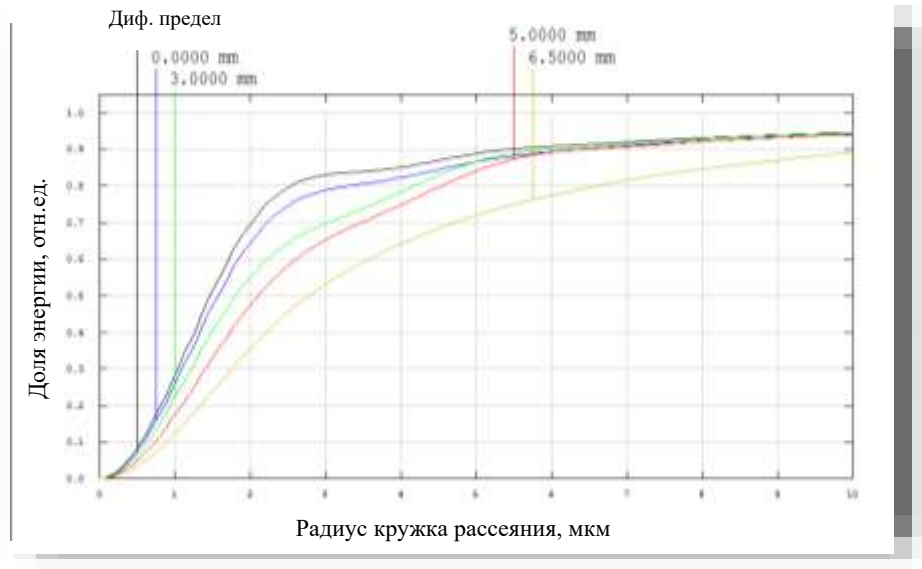
а)



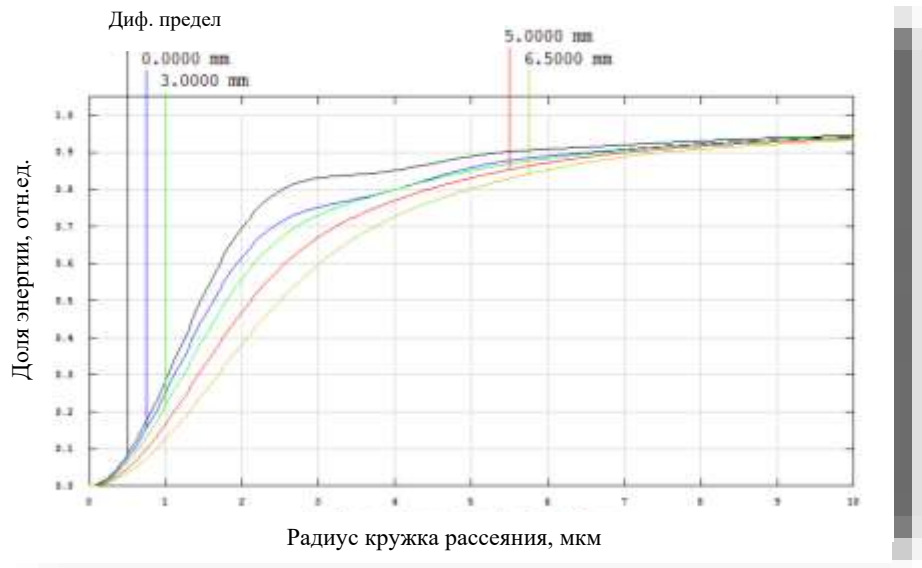
б)

Рисунок 3.6 – График частотно-контрастной характеристики: а) для исходной конфигурации системы; б) для конечной конфигурации системы

Среднеквадратичная величина радиуса пятна рассеяния, формируемого системой от точечного источника света в пространстве изображения, составляет 2,685 мкм, а частота Найквиста  $a=85 \text{ мм}^{-1}$  – более 0,6 отн. ед. для средней точки поля. На рисунке 3.7 (а) показано распределение световой энергии в кружке рассеяния для исходной конфигурации системы, на рисунке 3.7 (б) для конечного состояния системы.



а)



б)

Рисунок 3.7 – График распределения энергии в кружке рассеяния, формируемого системой от точечного источника света: а) для исходной конфигурации системы; б) для конечной конфигурации системы

Из графиков видно, что при радиусе пятна равном 2,685 мкм, плотность потока излучения, падающего на него, составляет более 72%, то есть полученная оптическая система для матрицы *SONY* высокой четкости с размером пикселя 5,86 x 5,86 мкм соответствует предъявляемым требованиям.

На рисунке 3.8 для наглядности качества изображения, формируемого спроектированной системой при ее максимальном фокусном расстоянии, представлено изображение, формируемое идеальной системой (рисунке 3.8, а) и рассчитанной (рисунке 3.8, б).



а)



б)

Рисунок 3.8 – Изображение, формируемое оптической системой:

а) дифракционного качества; б) спроектированной



Как видно из рисунка 3.8 изображения почти не отличаются друг от друга, т. о. объектив с переменным фокусным расстоянием имеет хорошие характеристики.

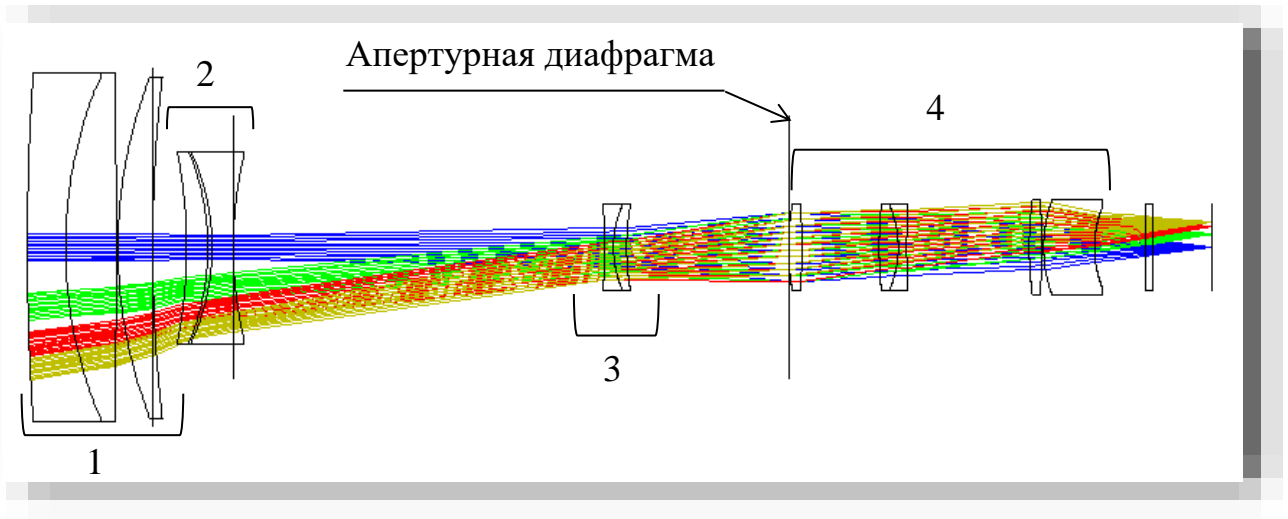
### 3.2 Восьмикратный объектив переменного фокусного расстояния с двумя отрицательными компонентами

В ходе проектирования была получена оптическая система с перепадом фокусных расстояний  $f'=25\dots 200$  мм, т.е. 8 крат, и относительным отверстием  $D/f'=1:4$ . Габариты оптической системы следующие: общая длина системы не превышает 280 мм, диаметр первой линзы не более 80 мм. В отличие от первого рассмотренного объектива, данная система не содержит асферических линз.

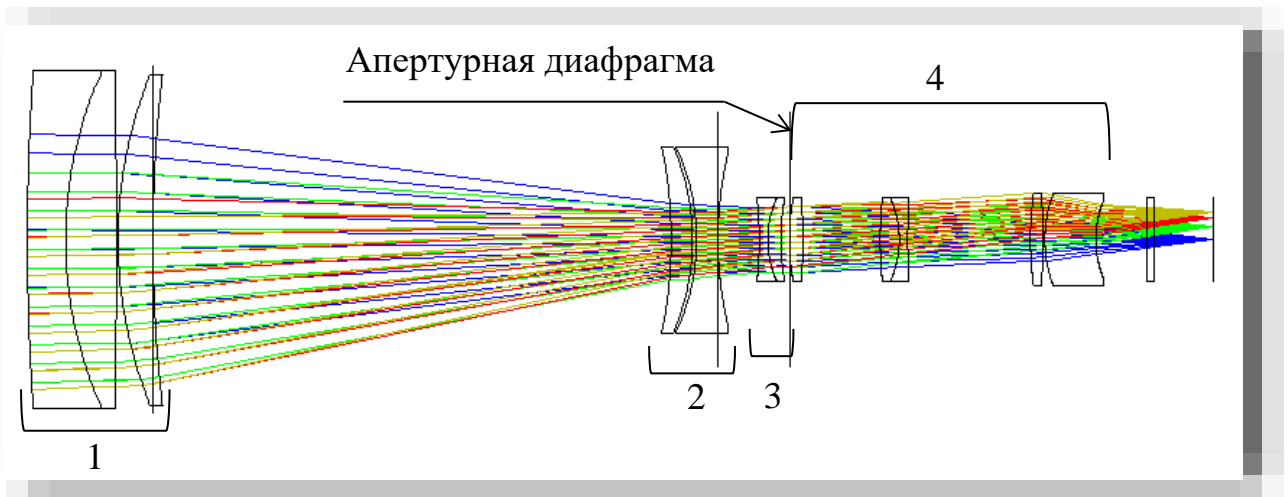
Апертурная диафрагма размещена перед неподвижным четвертым компонентом.

Проектирование объектива с переменным фокусным расстоянием осуществлялось в программе *Zemax* для матрицы *SONY*.

Полученная оптическая система с переменным фокусным расстоянием рассчитывалась для длин волн  $\lambda=0,600\dots 0,800$  мкм. Поле зрения объектива с переменным фокусным расстоянием составляет  $2\omega=3,7^\circ\dots 29,1^\circ$ . На рисунке 3.9 (а) показана конфигурация системы для поля зрения  $2\omega=29,1^\circ$  и фокусного расстояния  $f'=25$  мм, на рисунке 3.9 (б) конфигурация системы для поля зрения  $2\omega=3,7^\circ$  и фокусного расстояния  $f'=200$  мм. Система состоит из первого и четвертого положительного компонента, второго и третьего отрицательного. Всего в системе имеется 12 оптических деталей без учета светофильтра.



а)



б)

Рисунок 3.9 – Четырехкомпонентный объектив с переменным фокусным расстоянием, имеющий два отрицательных компонента: а) исходная конфигурация оптической системы  $f' = 25$  мм; б) конечная конфигурация оптической системы  $f' = 200$  мм

Второй и третий компоненты системы являются подвижными. На рисунке 3.10 показаны графики перемещения подвижных компонентов.



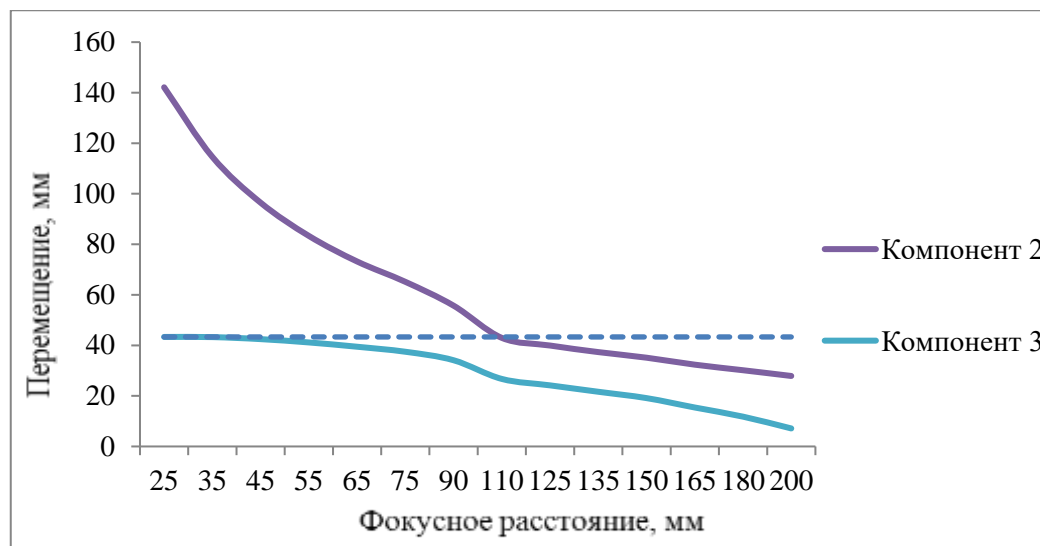
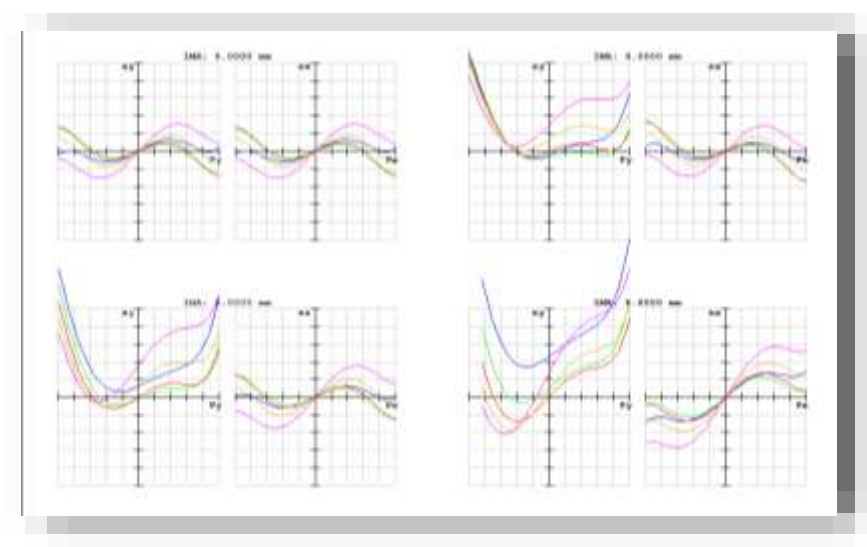


Рисунок 3.10 – График перемещения второго и третьего компонентов

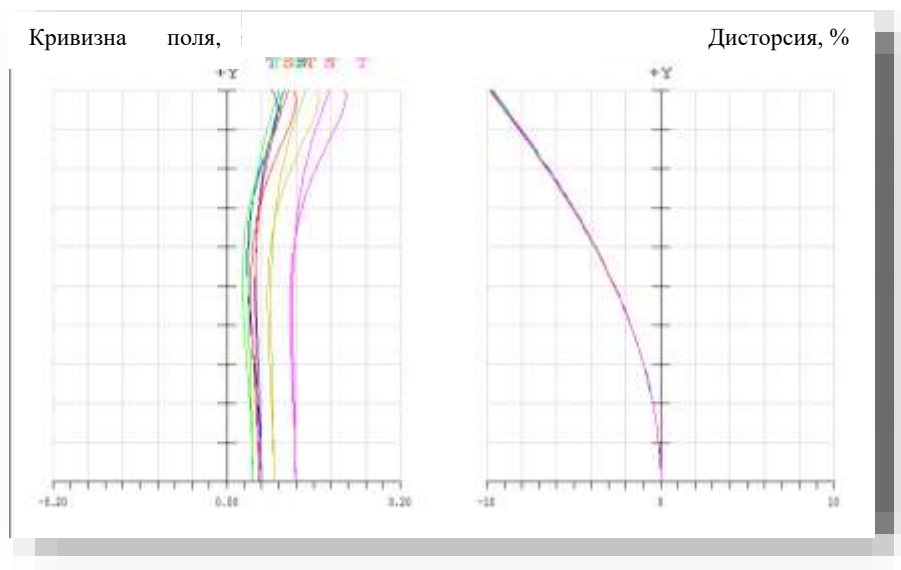
Движение компонентов осуществляется в одном направлении, от первого компонента к четвертому. Представленная на графике пунктирная линия показывает, что при фокусном расстоянии  $f=110$  мм второй компонент начинает двигаться по пути третьего компонента.

Элементом, формирующим оптическую силу компонента, для первого и второго компонентов служат вторые линзы, для четвертого компонента служит первая линза. Третий компонент состоит из склеенной линзы, aberrации которой скомпенсированы положительным мениском. Остальные линзы компонентов являются компенсационными элементами. В зависимости от конфигурации aberrации системы изменяются. В исходном состоянии системы первая линза первого компонента устраняет хроматические aberrации, сферическая aberrация отсутствует, кома незначительна. Первый компонент имеет большую положительную дисторсию, полевые aberrации малы. Вторым компонентом имеет неустраненную положительную дисторсию. Aberrации широкого пучка, хроматические aberrации и астигматизм, кривизна поля минимальные. Третий компонент имеет незначительные хроматические aberrации. Остальные aberrации не устранены. Четвертым компонентом имеет незначительные хроматические, полевые aberrации и aberrации широкого пучка малы.

Система в исходной конфигурации имеет неустранимую отрицательную дисторсию (около 10%, рисунок 3.11 (б)), незначительные хроматические aberrации, сферическую aberrацию, астигматизм и кривизну поля (от 0,02 мм, для длины волны 0,65 мкм и для координаты поля (0; 0,6) в меридиональной плоскости, до 0,14 мм, для длины волны 0,80 мкм и для координаты поля (0; 1) в меридиональной плоскости, рисунок 3.11 (а), (б)). Графики поперечных aberrаций (рисунок 3.11 (а)) для краевых полей зрения хуже, чем для осевого поля, что не так существенно.



а)

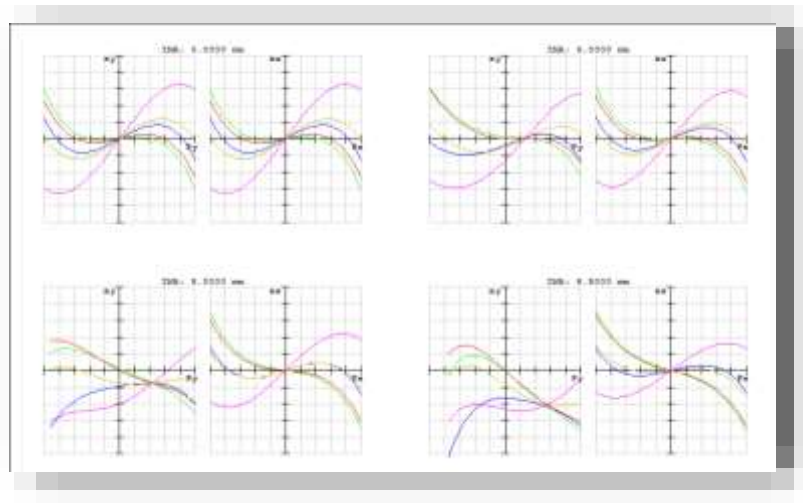


б)

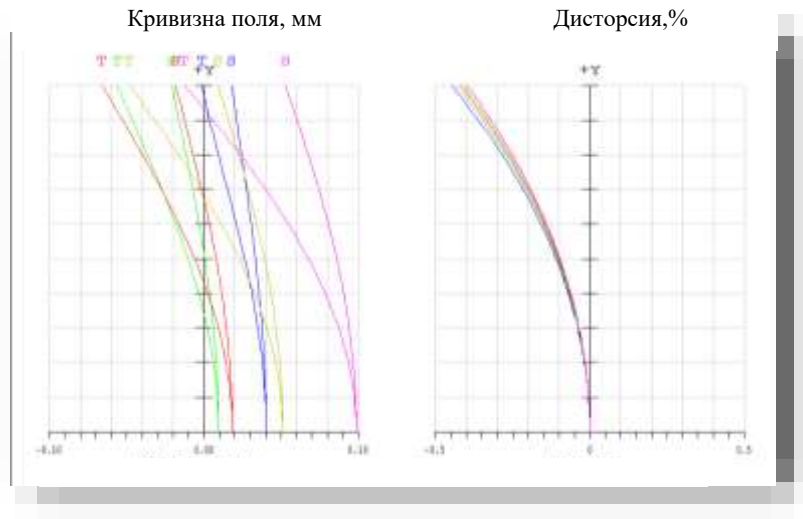
Рисунок 3.11 – а) графики поперечных aberrаций системы; б) графики кривизны поля и дисторсии соответственно для исходной конфигурации системы

В конечном состоянии системы, первый компонент имеет незначительные хроматические aberrации, выросли сферическая aberrация и кома. Полевые aberrации стали незначительны. Второй компонент имеет малые хроматические aberrации. Aberrации широкого пучка и плевые aberrации первого и второго компонентов противоположны по знаку и частично компенсируют друг друга. Третий компонент имеет незначительные хроматические aberrации и дисторсию. Aberrации четвертого компонента остаются постоянны, т.к. апертурная диафрагма расположена перед четвертым компонентом, для которого она является входным зрачком.

Система в конечном состоянии имеет незначительные сферическую aberrацию, астигматизм и кривизну поля (от  $-0,07$  мм для длины волны  $0,70$  мкм и для координаты поля  $(0; 1)$  в меридиональной плоскости до  $0,1$  мм для длины волны  $0,80$  мкм и для координаты поля  $(0; 0)$  в сагиттальной плоскости, рисунок 3.12, а) и незначительную положительную дисторсию ( $0,45\%$ , рисунок 3.12, б).



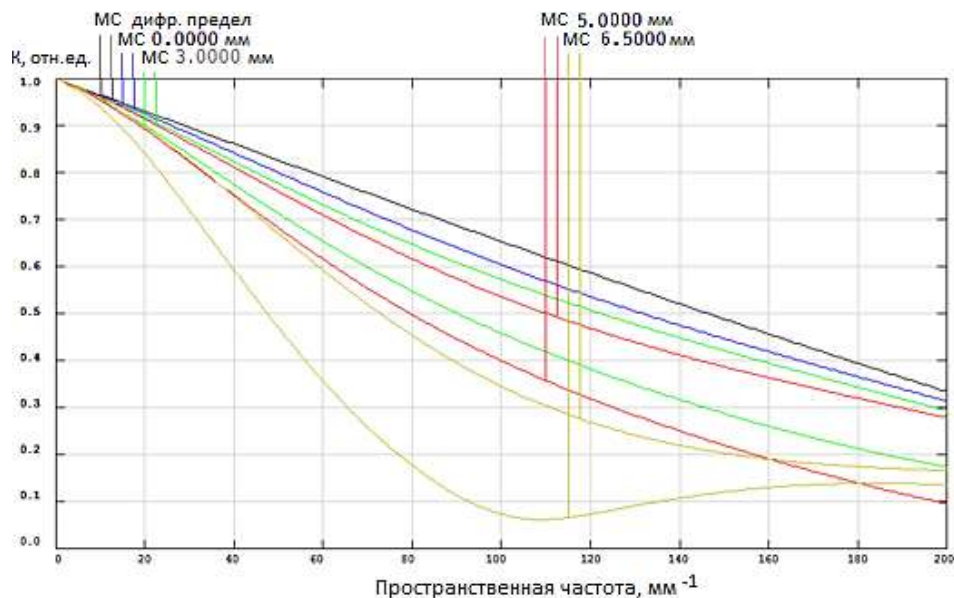
а)



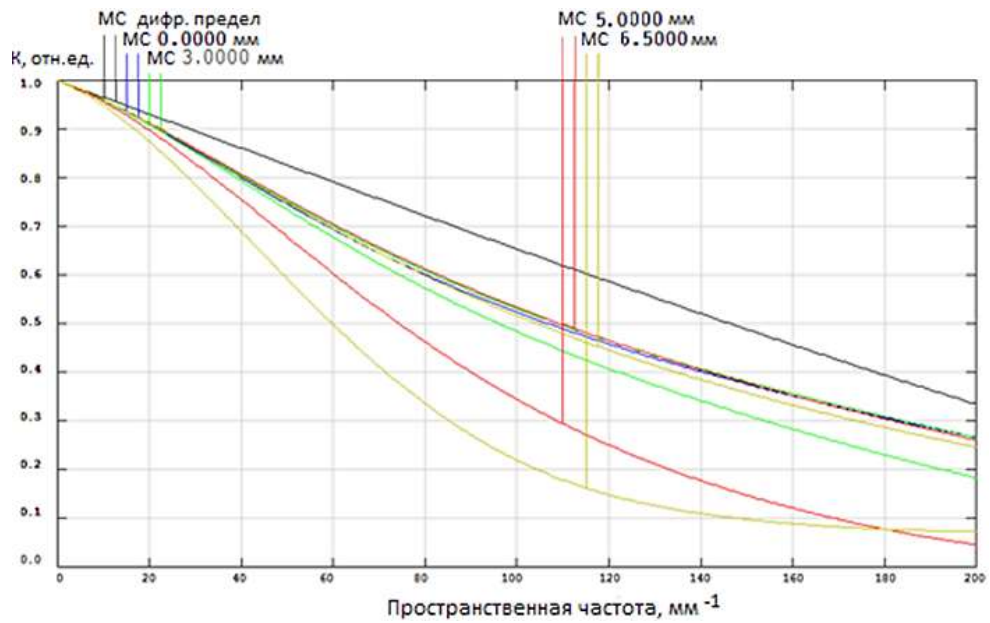
б)

Рисунок 3.12 – а) графики поперечных aberrаций системы; б) графики кривизны поля и дисторсии соответственно для конечной конфигурации системы

На рисунке 3.13 (а) представлен график частотно-контрастной характеристики для заданных полей зрения исходной конфигурации системы, на рисунке 3.13 (б) для конечного состояния системы. Крайнее поле, на графике кривая изображена желтым цветом, задано с запасом. Как видно из рисунка, для осевого пучка лучей частотно-контрастная характеристика близка к идеальной.



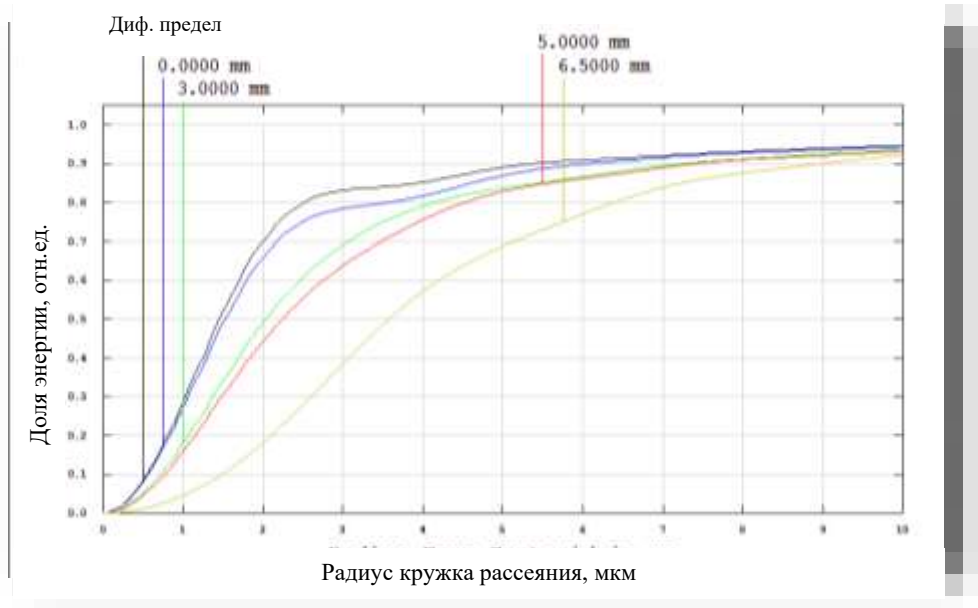
а)



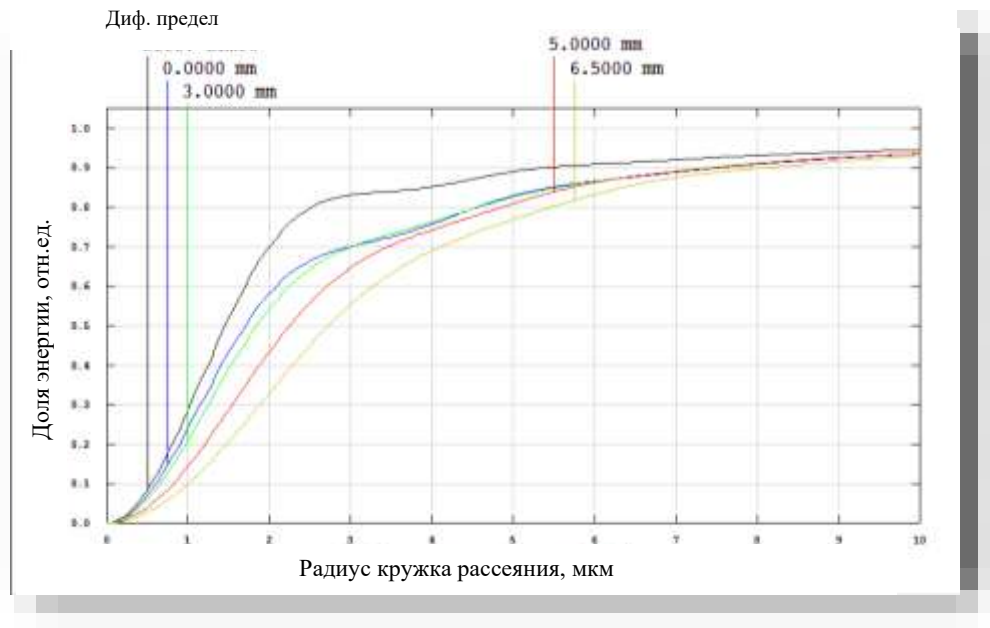
б)

Рисунок 3.13 – График частотно-контрастной характеристики: а) для исходной конфигурации системы; б) для конечной конфигурации системы

Среднеквадратичная величина радиуса пятна рассеяния, формируемого системой от точечного источника света, составляет 3,0 мкм, а частота Найквиста  $a=85 \text{ мм}^{-1}$  – более 0,6 отн.ед. для средней точки поля. На рисунке 3.14 (а) показано распределение световой энергии в кружке рассеяния для исходной конфигурации системы, на рисунке 3.14 (б) для конечного состояния системы.



а)



б)

Рисунок 3.14 – График распределения энергии в кружке рассеяния, формируемого системой от точечного источника света: а) для исходной конфигурации системы; б) для конечной конфигурации системы

Из графиков видно, что при радиусе пятна равном 3,0 мкм, плотность потока излучения, падающего на него, составляет более 70%, то есть полученная оптическая система для матрицы *SONY* высокой четкости с размером пикселя 5,86 x 5,86 мкм соответствует предъявляемым требованиям.

На рисунке 3.15 для наглядности качества изображения, формируемого спроектированной системой при ее максимальном фокусном расстоянии, представлено изображение, формируемое идеальной системой (рисунке 3.15, а) и рассчитанной (рисунке 3.15, б).



а)



б)

Рисунок 3.15 – Изображение, формируемое оптической системой: а) идеальной;  
б) спроектированной

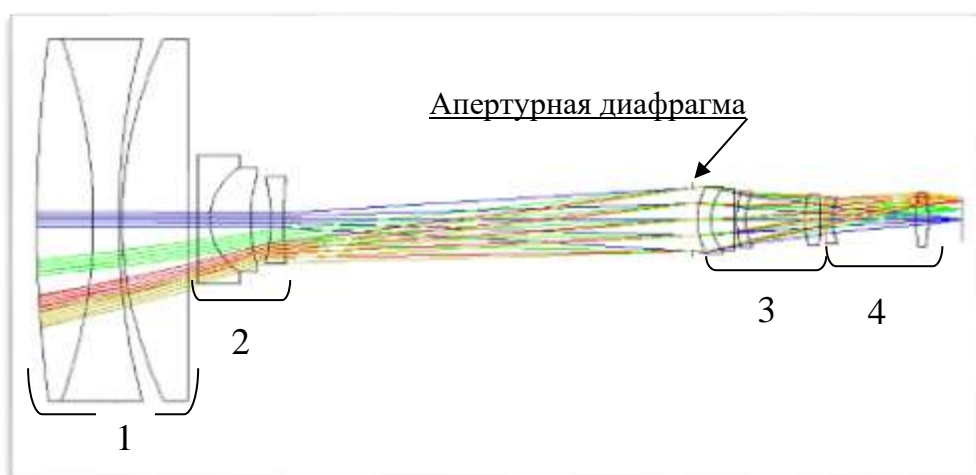
Как видно из рисунка 3.15, изображения почти не отличаются друг от друга, т. о. объектив с переменным фокусным расстоянием имеет хорошие характеристики.

### 3.3 Четырехкомпонентный двадцатикратный объектив переменного фокусного расстояния

Проектирование объектива с переменным фокусным расстоянием осуществлялось в программе *Zemax* для матрицы *SONY*.

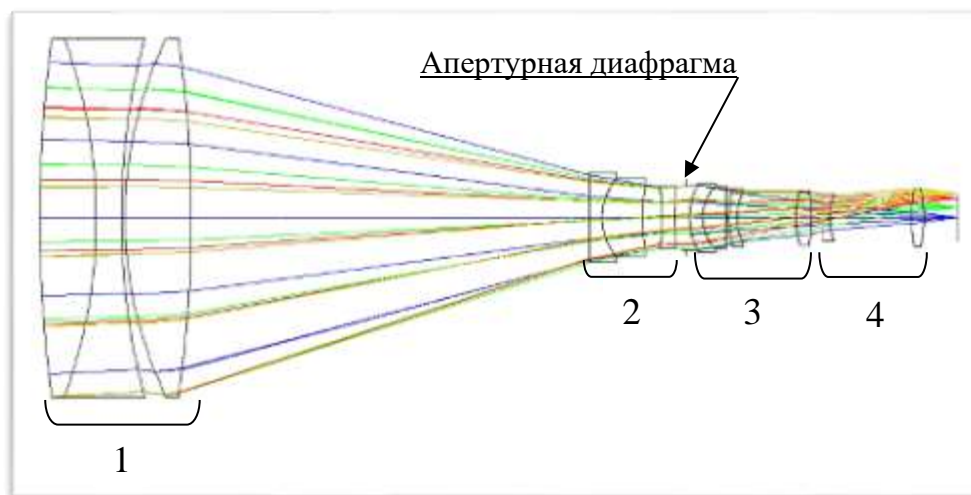


В ходе проектирования была получена оптическая система с перепадом фокусных расстояний  $f'=15\dots300$  мм, т.е. 20 крат, и относительным отверстием  $D/f'=1:4$  (рисунок 3.16). Габариты оптической системы следующие: общая длина системы не превышает 220 мм, диаметр первой линзы не более 90 мм. Система состоит из четырех компонентов, первый, третий и четвертый положительные, второй - отрицательный. Всего в системе имеется 3 склеенные линзы и 6 одиночных линз, т.е. всего 12 оптических деталей, не считая светофильтра. Полученная оптическая система с переменным фокусным расстоянием рассчитывалась для длин волн  $\lambda=0,600\dots0,850$  мкм. Поле зрения объектива с переменным фокусным расстоянием составляет  $2\omega=2,0^\circ\dots36^\circ30'$ . На рисунке 3.16 (а) показана конфигурация системы для поля зрения  $2\omega=36^\circ30'$  и фокусного расстояния  $f'=15$  мм, на рисунке 3.16 (б) конфигурация системы для поля зрения  $2\omega=2,0^\circ$  и фокусного расстояния  $f'=300$  мм.



а)





б)

Рисунок 3.16 – Двадцатикратный объектив с переменным фокусным расстоянием: а) исходная конфигурация системы  $f^*=15$  мм; б) конечное состояние системы  $f^*=300$  мм

Второй и третий компоненты являются подвижными. Система содержит две асферические линзы. Первая асферическая линза относится к первому компоненту, асферическая поверхность которой обращена к первой линзе. Вторая асферическая линза, асферическая поверхность которой обращена к склеенной линзе, относится к третьему компоненту. Апертурная диафрагма расположена между подвижными компонентами и является подвижной, поэтому ее диаметр регулируется для поддержания постоянной величины относительного отверстия. Следует отметить, что в зарубежных объективах с переменным фокусным расстоянием широко используются подвижные регулируемые апертурные диафрагмы.

Световой диаметр первой линзы объектива увеличивается при больших фокусах системы. Так как диаметр первой линзы выбран не более 90 мм, в оптической системе присутствует виньетирование при фокусе системы  $f^*=300$  мм, которое составляет для крайнего пучка лучей 13,3%, при этом относительное отверстие остается равным 1:4.

На рисунке 3.17 показаны графики перемещения подвижных компонентов при фокусировании системы от  $f^*=15$  мм к  $f^*=300$  мм. Второй и

третий компоненты вначале пути движутся навстречу друг другу, а после начинают совместное движение к четвертому компоненту, при этом второй компонент с определенного момента движется по пути третьего компонента.

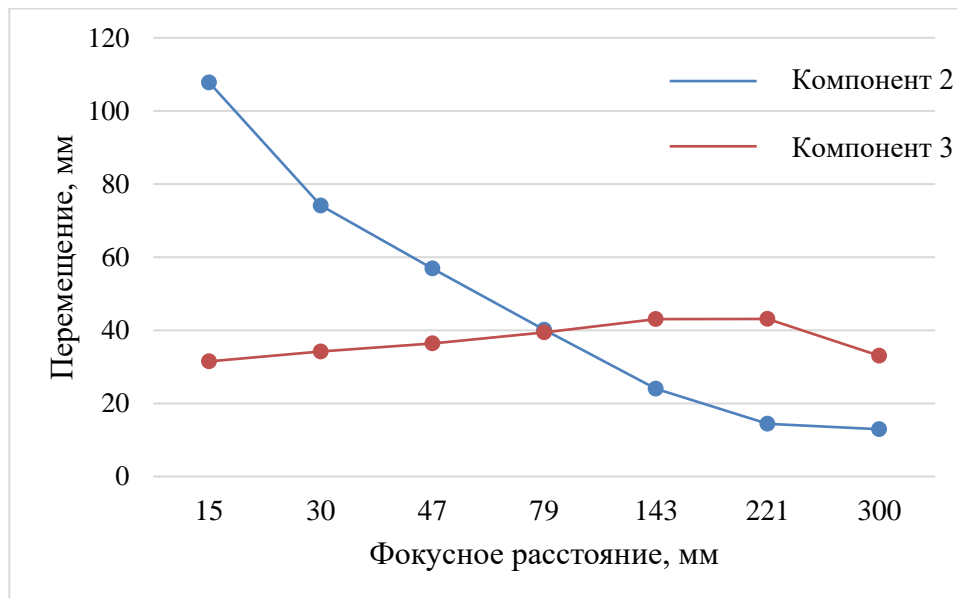


Рисунок 3.17 – График перемещения подвижных компонентов

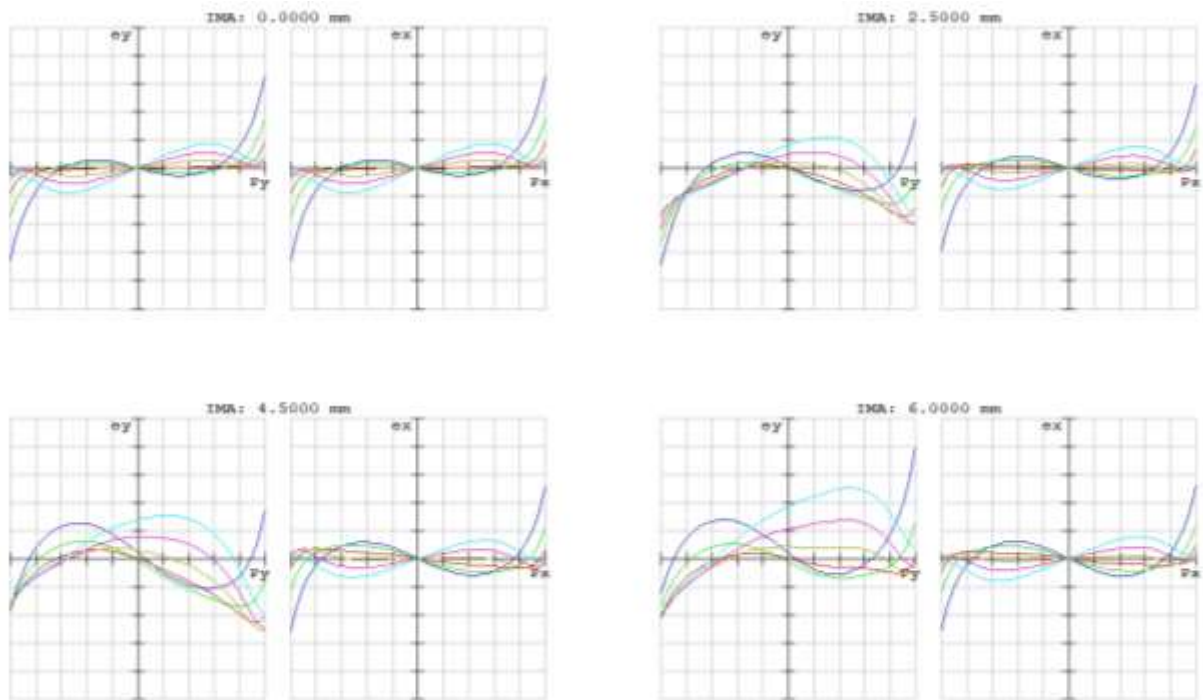
Первый компонент объектива телевизионной системы состоит из склейки и асферической линзы. Склейка позволяет скомпенсировать сферическую и хроматические aberrации первого компонента, а асферическая линза исправляет его астигматизм и кому.

Второй компонент состоит из склейки и одиночной линзы. Поскольку второй компонент короткофокусный, в ходе расчета параксиальная линза была заменена двумя одиночными для увеличения радиуса кривизны поверхностей первой линзы, также и в третьем компоненте. После чего к первой линзе второго компонента была добавлена еще одна линза для устранения сферической, хроматических aberrаций и комы, вторая линза также исправила астигматизм и кривизну поля.

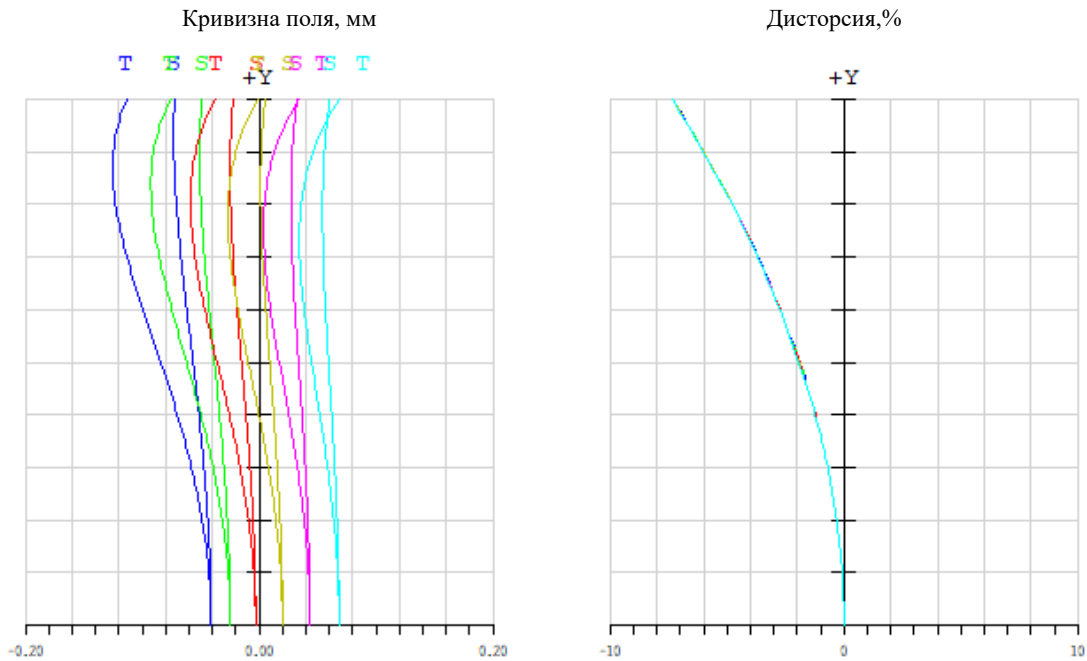
Асферическая линза третьего компонента уменьшила кривизну поля, скомпенсировала астигматизм и кому. Склейка была добавлена в завершении расчета, стекла которой были выбраны с приблизительно равными показателями преломления для исправления сферической и устранения хроматических aberrации при переходе от модели стекол к реальным стеклам.

Четвертый компонент, состоящий из двух линз, компенсирует остаточные aberrации объектива, а положительная линза четвертого компонента корректирует его кривизну поля.

Система в начальном состоянии имеет незначительные хроматические и сферическую aberrации, хроматизм увеличения, кому, астигматизм и кривизну поля (от  $-0,13$  мм, для длины волны  $0,600$  мкм и для координаты поля  $(0; 5)$  в меридиональной плоскости, до  $0,07$  мм, для длины волны  $0,850$  мкм и для координаты поля  $(0; 6)$  в сагиттальной плоскости, рисунок 3.18 (а)), неустраненную отрицательную дисторсию около  $7\%$  на краю поля, рисунок 3.18 (б).



а)

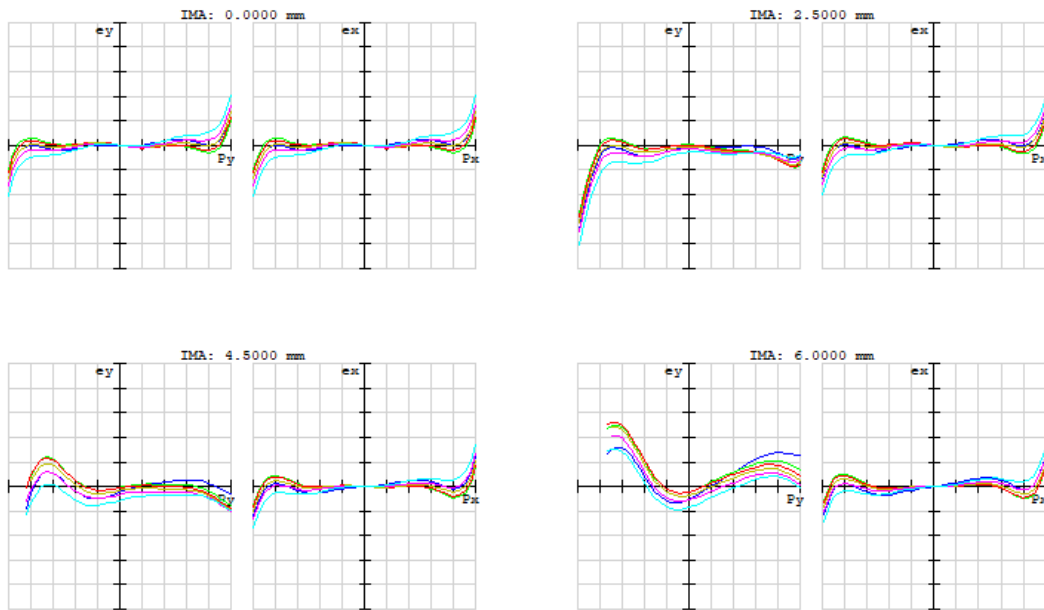


б)

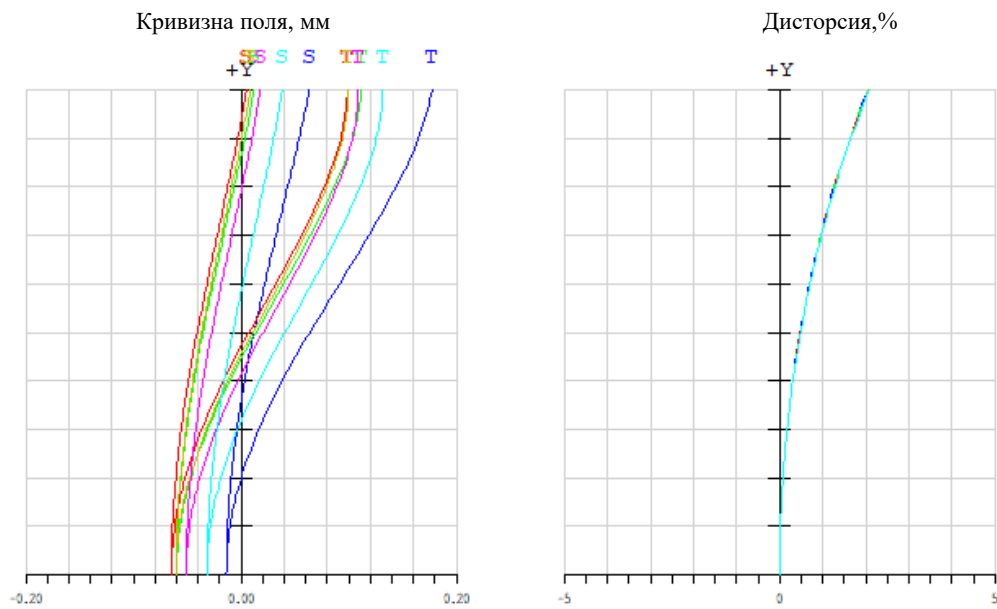
Рисунок 3.18 – а) графики поперечных aberrаций системы; б) графики кривизны поля и дисторсии соответственно для исходной конфигурации системы

Система в конечном состоянии имеет малую положительную дисторсию (2%, рисунок 3.19 (б)), незначительные сферическую aberrацию, кому, астигматизм и кривизну поля (от -0,065 мм, для длины волны 0,7 мкм и для координаты поля (0; 0) в сагиттальной плоскости, до 0,18 мм, для длины волны 0,6 мкм и для координаты поля (0; 6) в меридиональной плоскости, рисунок 3.19 (а), (б)) и небольшие хроматические aberrации.

На рисунке 3.20 (а) представлен график частотно-контрастной характеристики для заданных полей зрения исходной конфигурации системы, на рисунке 3.20 (б) для конечного состояния системы. Крайнее поле (на графике кривая изображена желтым цветом) задано с запасом. Как видно из рисунка, для осевого пучка лучей исходной конфигурации системы частотно-контрастная характеристика близка к идеальной, для конечного состояния системы частотно-контрастная характеристика имеет хорошие значения.

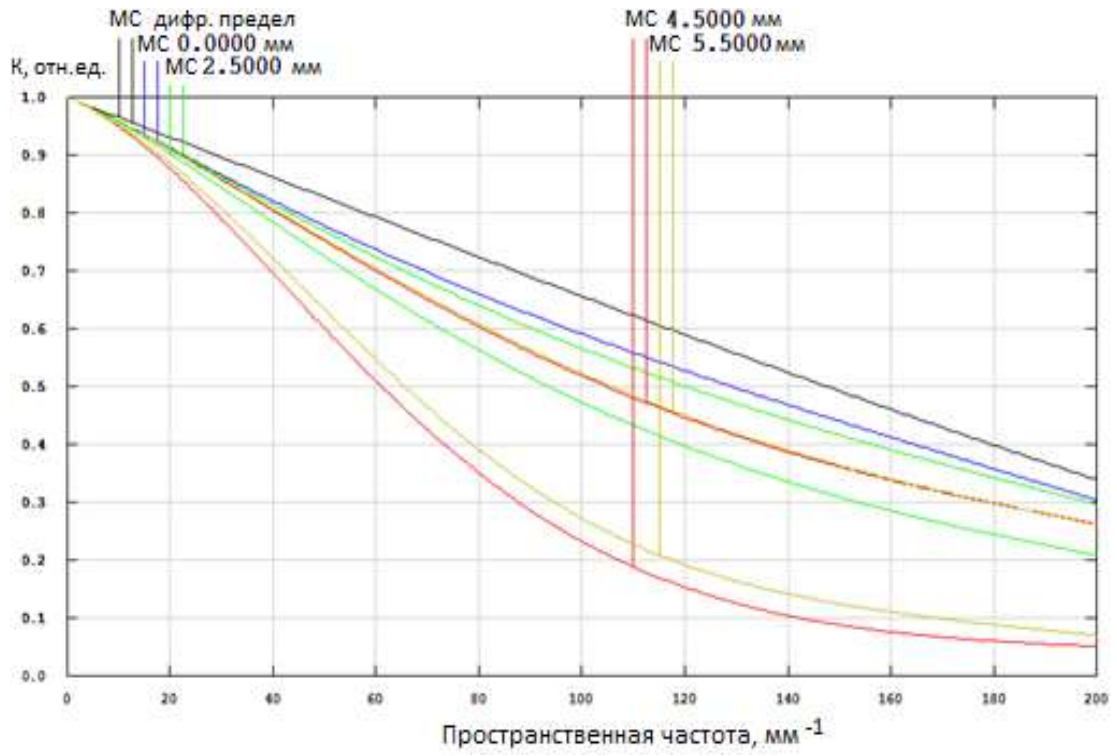


а)

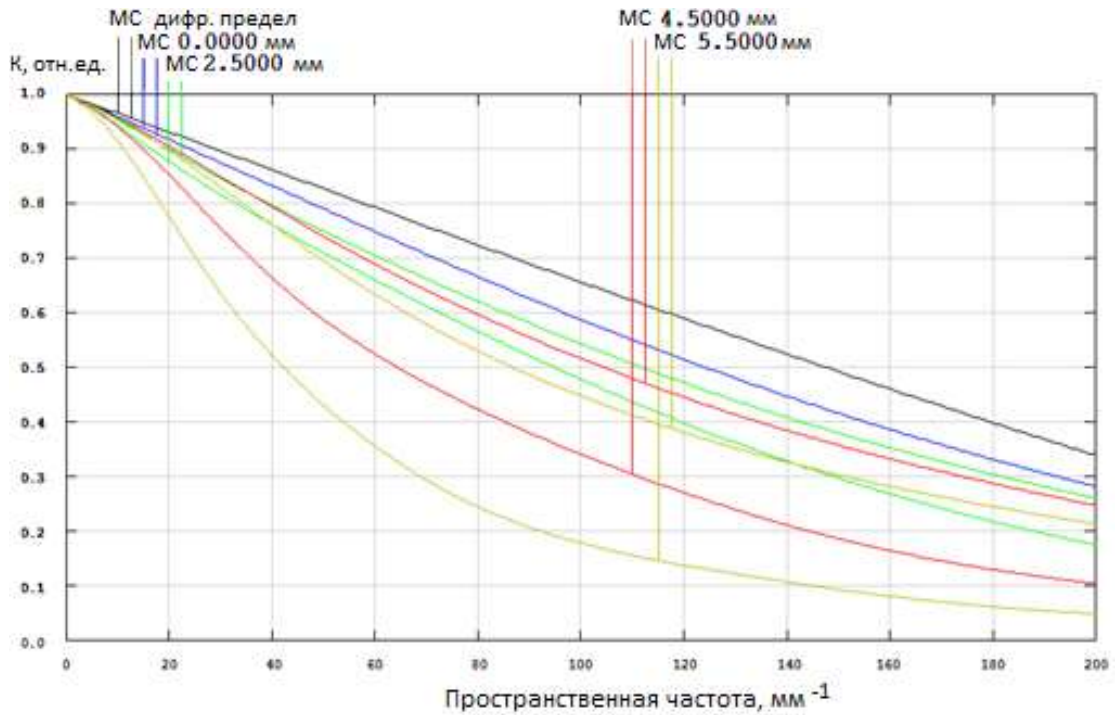


б)

Рисунок 3.19 – а) графики поперечных аберраций системы; б) графики кривизны поля и дисторсии соответственно для конечной конфигурации системы



а)

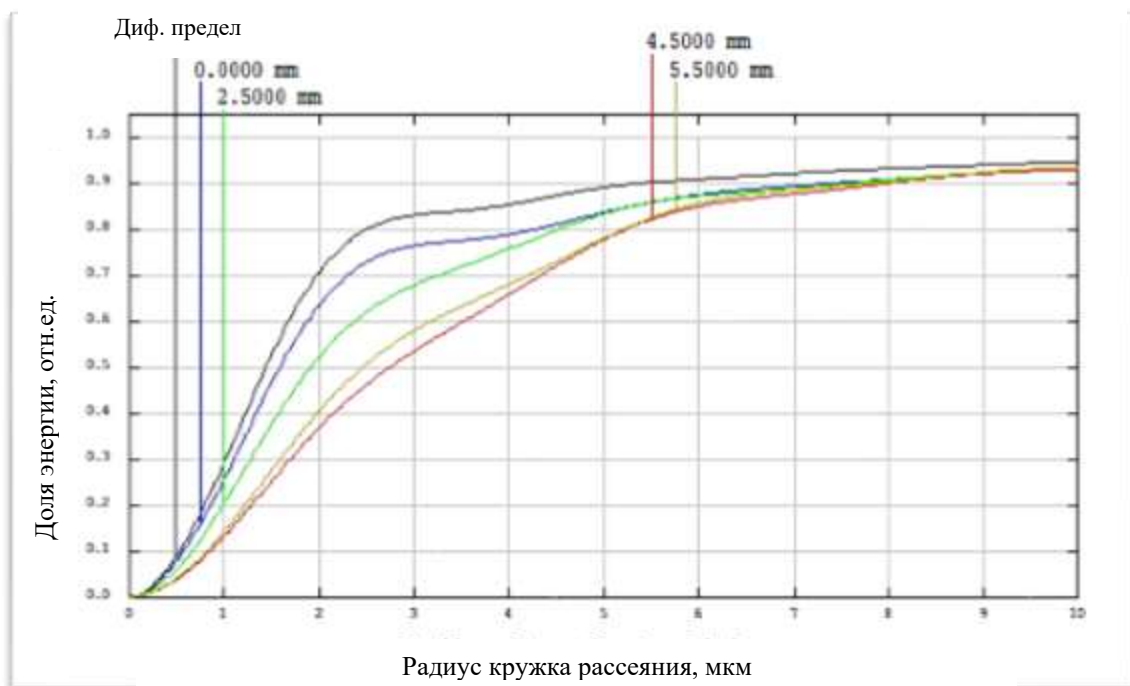


б)

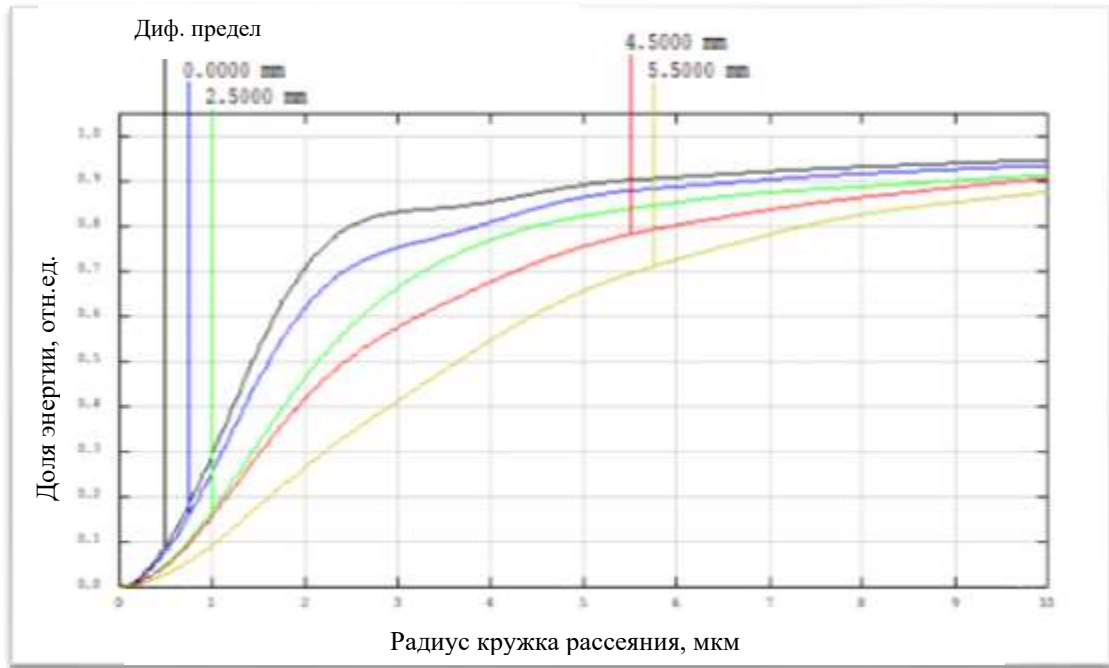
Рисунок 3.20 – График частотно-контрастной характеристики: а) для исходной конфигурации системы; б) для конечной конфигурации системы

Среднеквадратичная величина радиуса пятна рассеяния, формируемого системой от точечного источника света, составляет 3,42 мкм, а частота

Найквиста  $a=85 \text{ мм}^{-1}$  – более 0,6 отн.ед. для осевой или центральной точки поля. На рисунке 3.21 (а) показано распределение световой энергии в кружке рассеяния для исходной конфигурации системы, на рисунке 3.21 (б) для конечного состояния системы, откуда видно, что при радиусе пятна равном 3,42 мкм, плотность потока излучения, падающего на него, составляет около 76% для исходной конфигурации системы, около 75% для конечного состояния системы, то есть полученная оптическая система для матрицы *SONY* высокой четкости с размером пикселя 5,86 x 5,86 мкм соответствует предъявляемым требованиям.



а)



б)

Рисунок 3.21 – Графики распределения энергии в кружке рассеяния, формируемого системой от точечного источника света: а) для исходной конфигурации системы; б) для конечной конфигурации системы

Кроме того, среднеквадратичное отклонение волнового фронта объектива с переменным фокусным расстоянием составляет около 0,1 отн.ед., т.о. полученная система имеет хорошее качество.

При необходимости уменьшения диаметра первого компонента, в частности если поставлены жесткие условия на габариты объектива, можно либо увеличить виньетирование системы, либо увеличивать количество подвижных компонентов.

### 3.4 Шестикомпонентный двадцатикратный объектив переменного фокусного расстояния

При проектировании данного объектива была получена четырехкомпонентная система, второй и четвертый компоненты которого были разделены для улучшения абберационной коррекции системы в



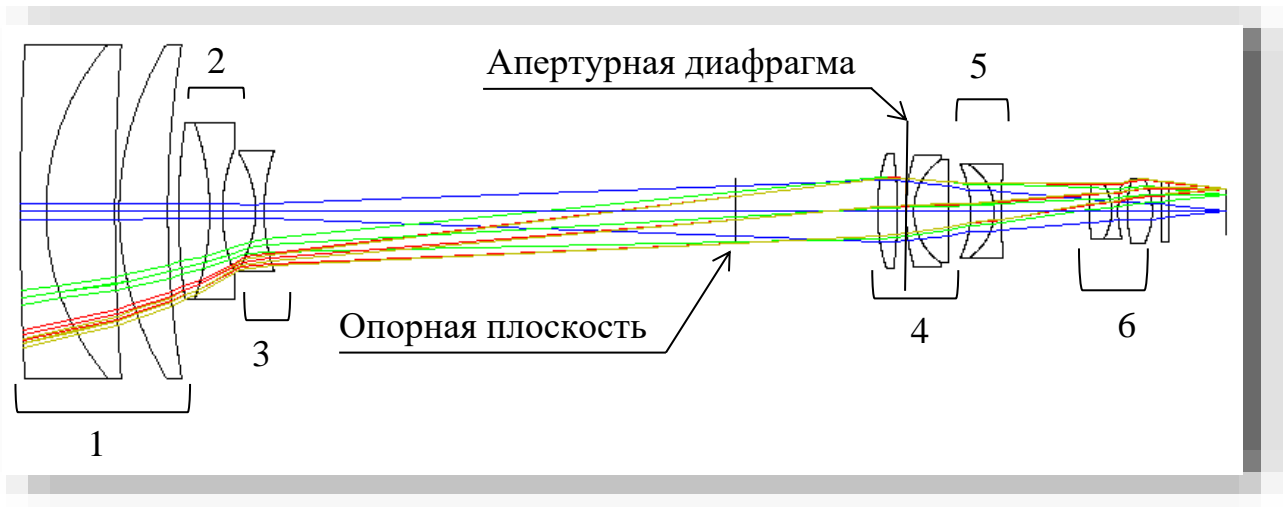
длиннофокусных конфигурациях. Проектирование объектива с переменным фокусным расстоянием осуществлялось в программе *Zemax* для матрицы *SONY*.

В ходе проектирования была получена оптическая система с перепадом фокусных расстояний  $f'=17...350$  мм, т.е. 20 крат, и относительным отверстием  $D/f'=1:4$  (рисунок 3.22). Габариты оптической системы следующие: общая длина системы не превышает 282 мм, диаметр первой линзы не более 80 мм. Система состоит из шести компонентов, первый, четвертый, шестой – положительные, второй, третий, пятый – отрицательные. Всего в системе имеется 5 склеенных линз и 4 одиночных линзы, т.е. всего 14 оптических деталей, не считая светофильтра. Полученная оптическая система с переменным фокусным расстоянием рассчитывалась для длин волн  $\lambda=0,600...0,850$  мкм. Поле зрения объектива с переменным фокусным расстоянием составляет  $2\omega=2,1^\circ...42^\circ$ . На рисунке 3.22 (а) показана конфигурация системы для поля зрения  $2\omega=42^\circ$  и фокусного расстояния  $f'=17$  мм, на рисунке 3.22 (б) конфигурация системы для поля зрения  $2\omega=2,1^\circ$  и фокусного расстояния  $f'=350$  мм.

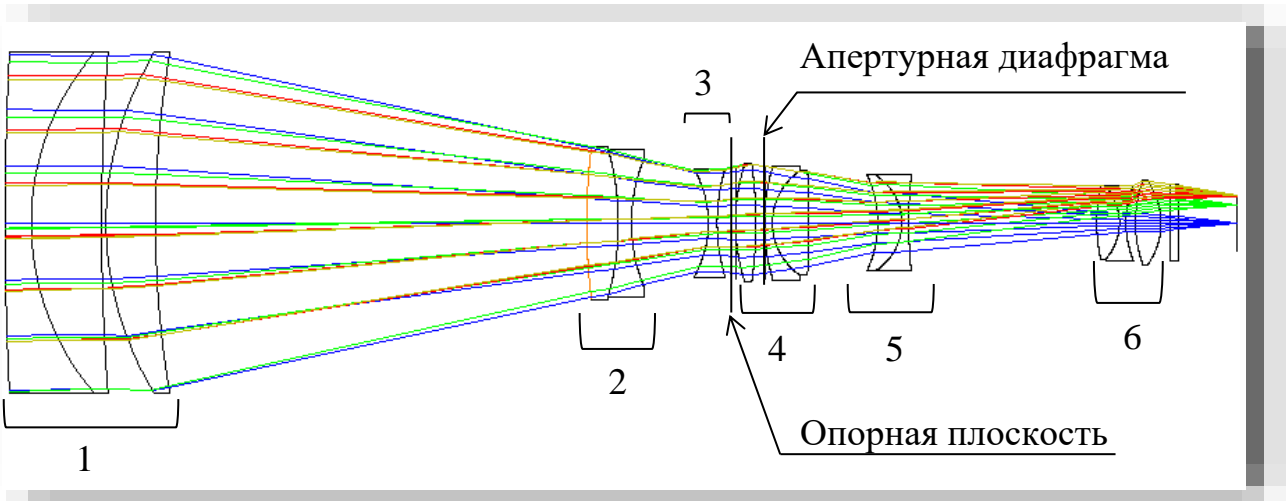
Второй, третий, четвертый и пятый компоненты являются подвижными. Система содержит две асферические линзы. Первая асферическая линза относится к первому компоненту, асферическая поверхность которой обращена к первой линзе. Вторая асферическая линза, асферическая поверхность которой обращена ко второму компоненту, является третьим компонентом. Апертурная диафрагма расположена между первой и второй линзой подвижного четвертого компонента. Диаметр ее регулируется для поддержания постоянной величины относительного отверстия, поскольку апертурная диафрагма является подвижной.

Световой диаметр первой линзы объектива увеличивается при больших фокусах системы. Так как диаметр первой линзы выбран не более 80 мм, в оптической системе присутствует виньетирование при фокусе системы  $f'=350$  мм, которое составляет для осевого пучка лучей 10,5%, для крайнего

наклонного пучка лучей 16,8%, при этом относительное отверстие становится равным  $D/f'=1:4,5$ .



а)



б)

Рисунок 3.22 – Двадцатикратный объектив с переменным фокусным расстоянием: а) исходная конфигурация системы  $f'=17$  мм; б) конечное состояние системы  $f'=350$  мм

На рисунке 3.23 показаны графики перемещения подвижных компонентов. Пунктирной линией показана опорная плоскость. Второй и третий, четвертый и пятый компоненты движутся навстречу друг другу. Второй и пятый компоненты следуют за третьим и четвертым компонентами соответственно, т.е. движутся по пути этих компонентов, что нежелательно.

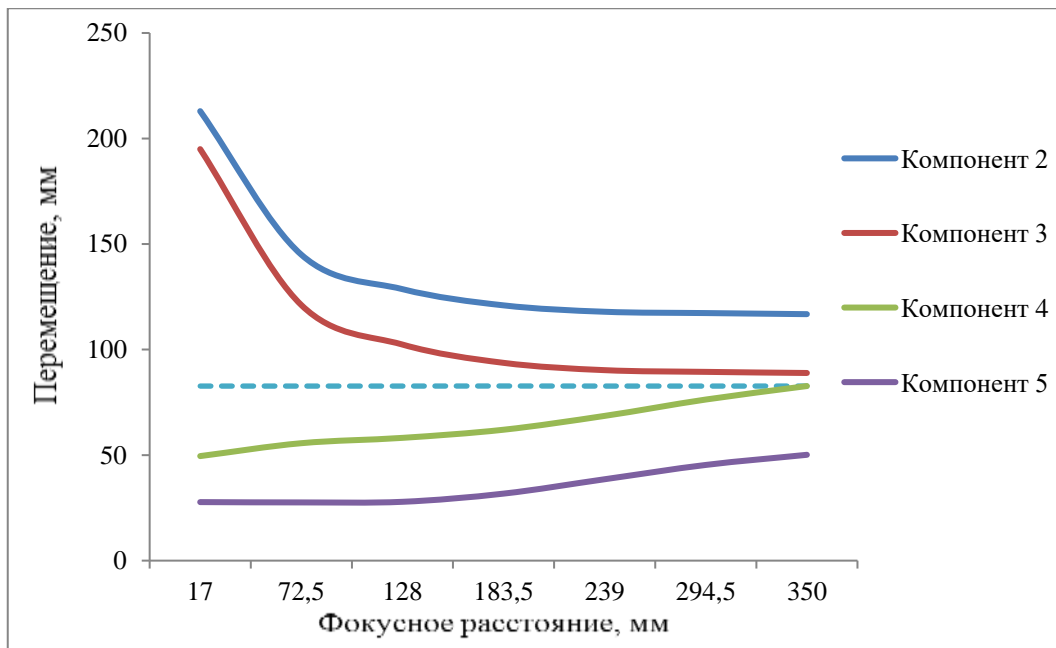
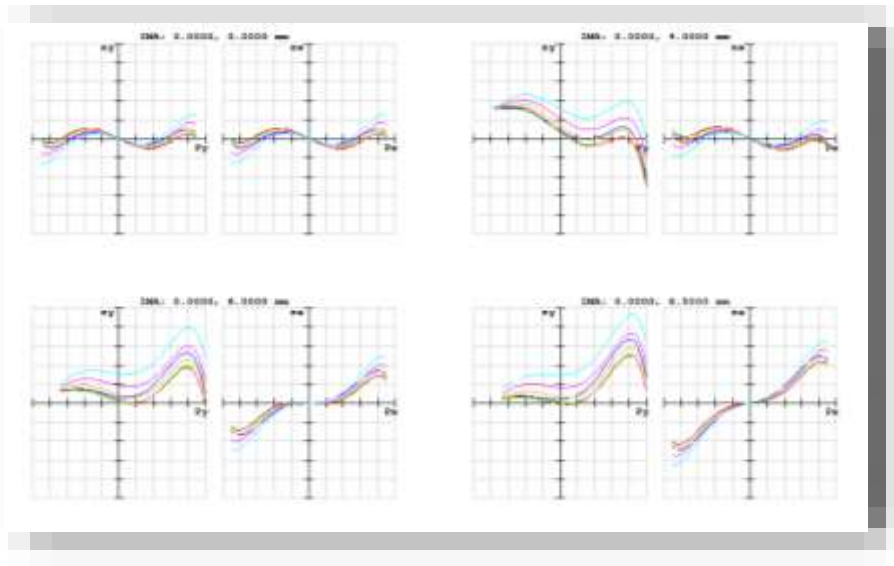


Рисунок 3.23 – График перемещения подвижных компонентов

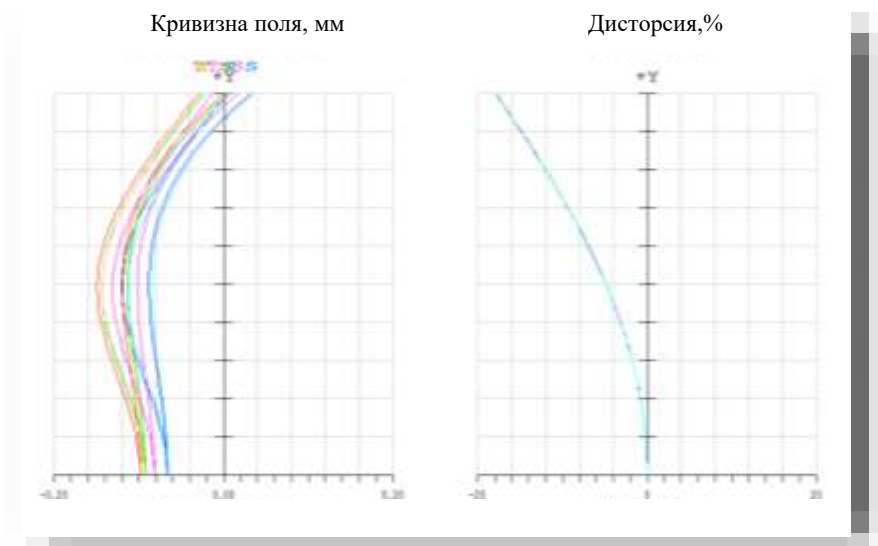
В зависимости от положения подвижных компонентов меняется диаметр апертурной диафрагмы.

Элементом, формирующим оптическую силу компонента, для первого и шестого компонентов служат вторые линзы, для четвертого компонента служит первая линза, другие линзы этих компонентов являются коррекционными. Третий и пятый компоненты являются элементами, формирующими оптическую силу компонента. В зависимости от положения входного зрачка aberrации системы изменяются. В исходном состоянии системы в первом компоненте скомпенсированы хроматические aberrации, астигматизм и кривизна поля, сферическая aberrация отсутствует, кома незначительна, имеется некомпенсированная дисторсия. Вторым и третий компоненты компенсируют друг друга, однако присутствует дисторсия, недостаточно скомпенсированная вторым компонентом. Также четвертый и пятый компоненты компенсируют друг друга, но имеются незначительные aberrации, так астигматизм недостаточно скомпенсирован пятым компонентом. Первая линза шестого компонента компенсирует aberrации линзы, формирующей оптическую силу компонента, однако существуют небольшие дисторсия и кривизна поля.

Система в начальном состоянии имеет незначительные сферическую aberrацию, кому, астигматизм и кривизну поля (от  $-0,15$  мм, для длины волны  $0,7$  мкм и для координаты поля  $(0; 0,5)$  в меридиональной плоскости, до  $0,035$  мм, для длины волны  $0,60$  мкм и для координаты поля  $(0; 1)$  в сагиттальной плоскости и хроматические aberrации, рисунок 3.24 (а)), неустранимую положительную дисторсию (около  $18\%$ , рисунок 3.24 (б)).



а)

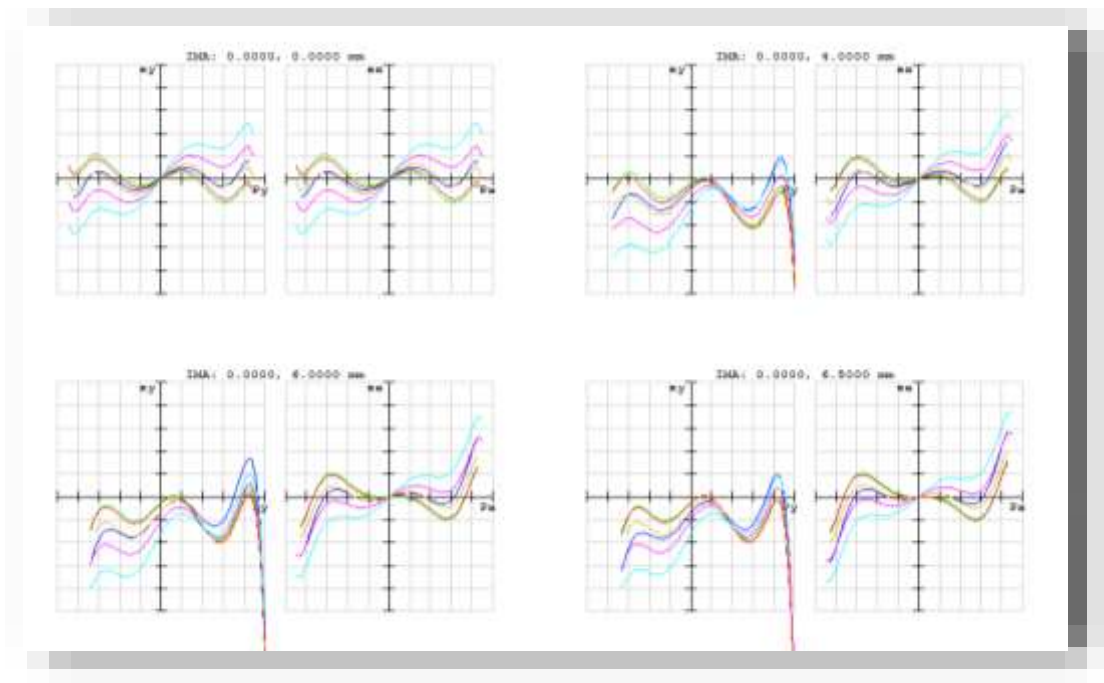


б)

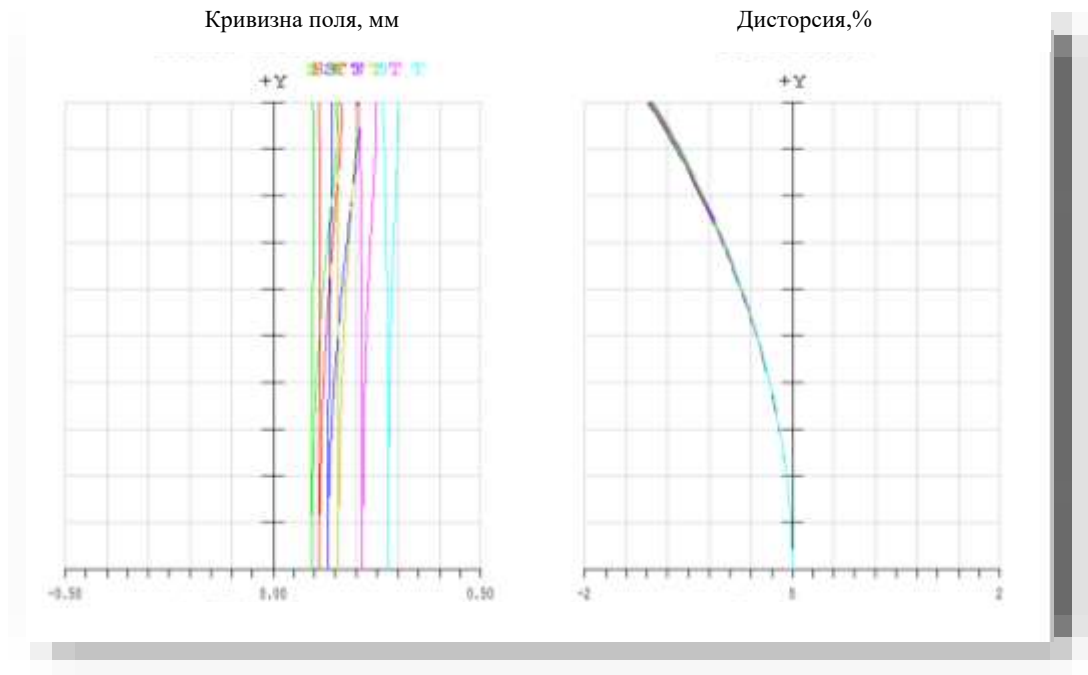
Рисунок 3.24 – а) графики поперечных aberrаций системы; б) графики кривизны поля и дисторсии соответственно для исходной конфигурации системы

В конечном состоянии системы в первом компоненте некомпенсированная сферическая aberrация, остальные aberrации незначительны. Второй и третий компоненты компенсируют друг друга, однако присутствует сферическая aberrация, не полностью скомпенсированная вторым компонентом. Также четвертый и пятый компоненты компенсируют друг друга, но имеются незначительные aberrации, так сферическая aberrация частично скомпенсирована пятым компонентом. Aberrационные характеристики шестого компонента остались практически без изменения. Компоненты системы компенсируют друг друга.

Система в конечном состоянии имеет малую положительную дисторсию (1,4%, рисунок 3.25 (б)), незначительные сферическую aberrацию, кому, астигматизм и кривизну поля (от 0,1 мм, для длины волны 0,65 мкм и для координаты поля (0; 1) в сагиттальной плоскости, до 0,3 мм, для длины волны 0,85 мкм и для координаты поля (0; 1) в меридиональной плоскости, рисунок 3.25 (а), (б)) и хроматические aberrации.



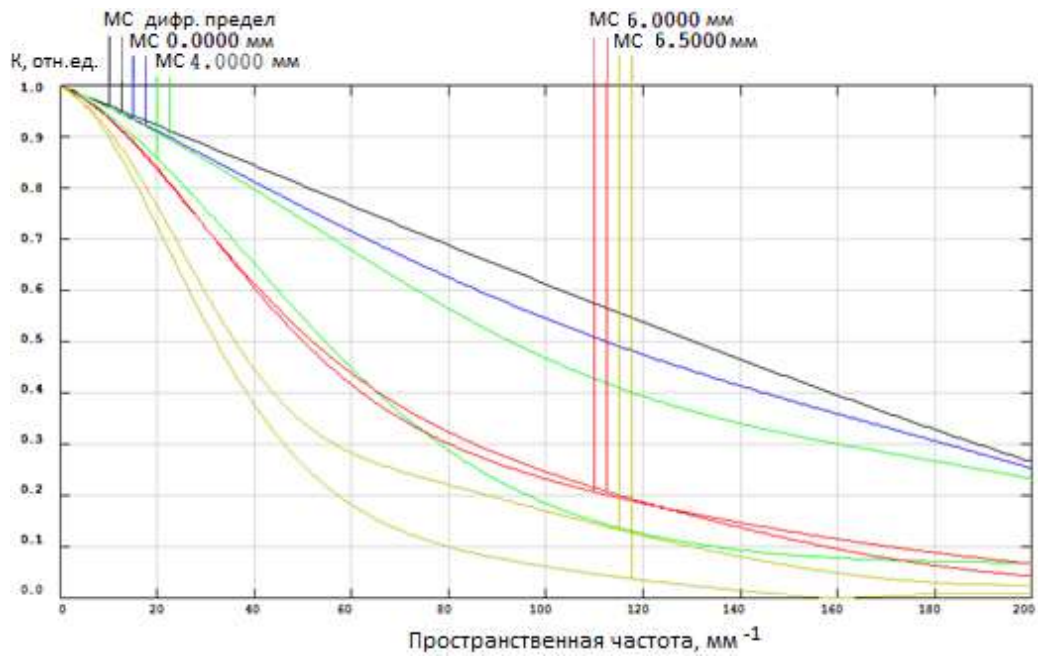
а)



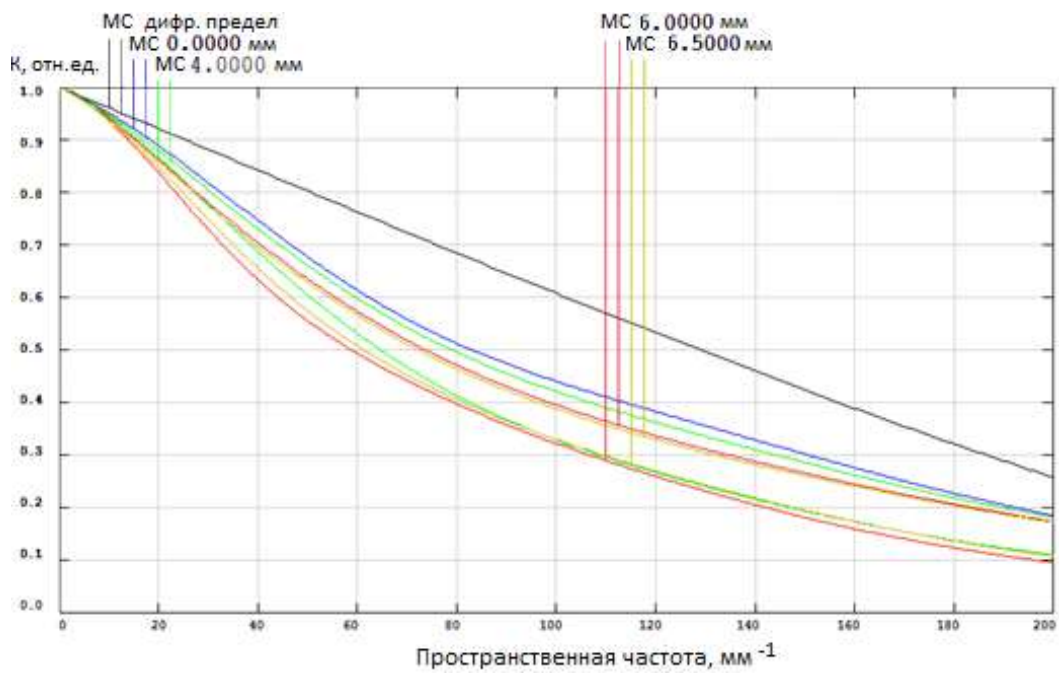
б)

Рисунок 3.25 – а) графики поперечных aberrаций системы; б) графики кривизны поля и дисторсии соответственно для конечной конфигурации системы

На рисунке 3.26 (а) представлен график частотно-контрастной характеристики для заданных полей зрения исходной конфигурации системы, на рисунке 3.26 (б) для конечного состояния системы. Крайнее поле (на графике кривая изображена желтым цветом) задано с запасом. Как видно из рисунка, для осевого пучка лучей исходной конфигурации системы частотно-контрастная характеристика близка к идеальной, для конечного состояния системы частотно-контрастная характеристика имеет хорошие значения.



а)

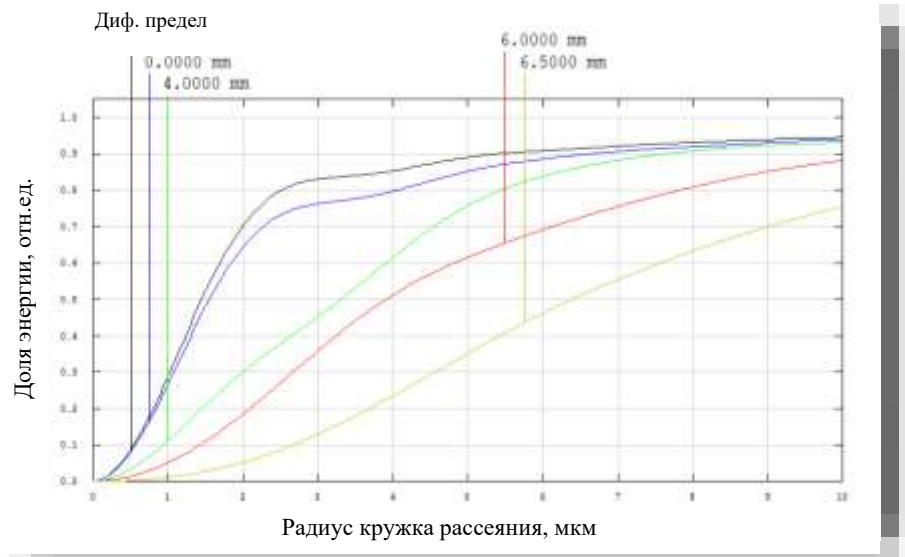


б)

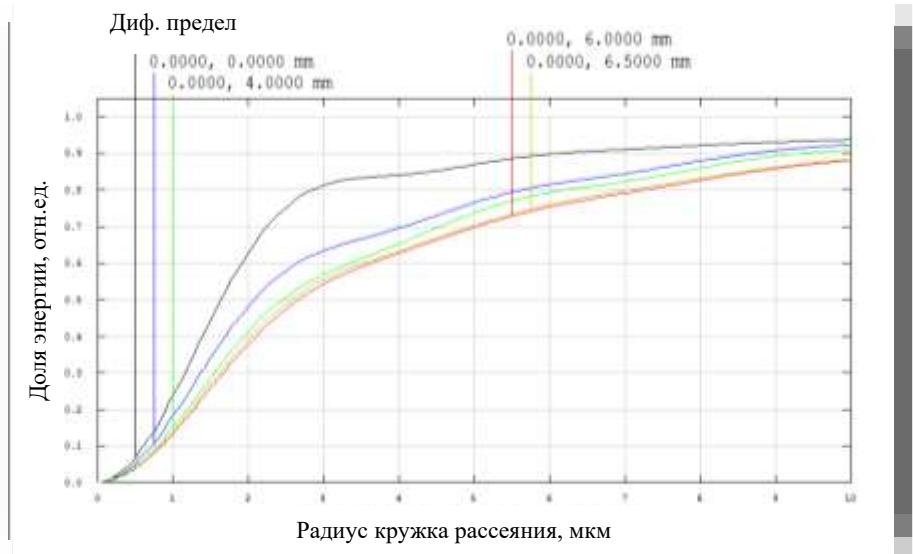
Рисунок 3.26 – График частотно-контрастной характеристики: а) для исходной конфигурации системы; б) для конечной конфигурации системы

Среднеквадратичная величина радиуса пятна рассеяния, формируемого системой от точечного источника света, составляет 3,051 мкм, а частота Найквиста  $a=85 \text{ мм}^{-1}$  – выше 0,5 отн.ед. для осевой или центральной точки

поля. На рисунке 3.27 (а) показано распределение световой энергии в кружке рассеяния для исходной конфигурации системы.



а)



б)

Рисунок 3.27 – Графики распределения энергии в кружке рассеяния, формируемого системой от точечного источника света: а) для исходной конфигурации системы; б) для конечной конфигурации системы

На рисунке 3.27 (б) для конечного состояния системы, откуда видно, что при радиусе пятна равном 3,051 мкм, плотность потока излучения, падающего на него, составляет более 75% для исходной конфигурации системы, около 65% для конечного состояния системы, то есть полученная оптическая система для



матрицы *SONY* высокой четкости с размером пикселя 5,86 x 5,86 мкм соответствует предъявляемым требованиям.

На рисунке 3.28 для наглядности качества изображения, формируемого спроектированной системой при ее максимальном фокусном расстоянии, представлено изображение, формируемое идеальной системой (рисунке 3.28, а) и рассчитанной (рисунке 3.28, б).



а)



б)

Рисунок 3.28 – Изображение, формируемое оптической системой: а) идеальной;  
б) спроектированной

Как видно из рисунка 3.28 изображения почти не отличаются друг от друга, т. о. объектив с переменным фокусным расстоянием имеет хорошие характеристики.

Вышерассмотренные объективы с переменным фокусным расстоянием удовлетворяют требуемому качеству изображения, которое необходимо при использовании камеры ОПИИС.

В таблицах 3.2 и 3.3 приведены функциональные характеристики двухканальной ОПИИС и ОПИИС с объективами переменного фокусного расстояния соответственно.

Таблица 3.2 – Функциональные характеристики двухканальной ОПИИС

Наименование характеристик	ТВ-канал (патент 2690098 РФ)	ТВ-канал (Термостабилизированный объектив)
	Значения	
Отношение фокусных расстояний каналов	2,4 <sup>x</sup>	
Область длин волн, мкм	0,6...0,8	0,4...0,85
Угловое поле, град	3,6	6
Фокусное расстояние, мм	180	75
Относительное отверстие, отн. ед.	1:3,6	1:4,1
Дальность обнаружения предмета (при $P \geq 0,9$ ), км	9,5	4,8
Дальность опознавания предмета (при $P \geq 0,9$ ), км	3,1	1,4
Дальность идентификации предмета (при $P \geq 0,9$ ), км	2,1	0,8

Таблица 3.3 – Функциональные характеристики ОПИИС с объективами переменного фокусного расстояния

Наименование характеристик	Значения			
	8 <sup>x</sup>	8 <sup>x</sup>	20 <sup>x</sup>	20 <sup>x</sup>
Кратность	8 <sup>x</sup>	8 <sup>x</sup>	20 <sup>x</sup>	20 <sup>x</sup>
Область длин волн, мкм	0,6...0,8	0,6...0,8	0,6...0,85	0,6...0,85
Угловое поле, град	3,7...29,1	3,7...29,1	2...36,5	2,1...42
Фокусное расстояние, мм	25...200	25...200	15...300	17...350
Относительное отверстие, отн. ед.	1:4	1:4	1:4	1:4...1:4,5
Дальность обнаружения предмета (при $P \geq 0,9$ ), км	1,5...11	1,5...11	0,5...15,5	0,5...17
Дальность опознавания предмета (при $P \geq 0,9$ ), км	3,5	3,5	5,3	6,5
Дальность идентификации предмета (при $P \geq 0,9$ ), км	1,2	1,2	2,7	3,1

Из таблиц видно, что ОПИИС с объективами переменного фокусного расстояния имеют более высокие оптические характеристики, что позволяет повысить обнаружительную и опознавательную способность. Объективы переменного фокусного расстояния при необходимости могут заменить и несколько ТВ-каналов, если требуется улучшить функциональные характеристики ОПИИС, за счет расширения характеристик оптической системы, вести непрерывное наблюдение за объектом, уменьшить массу и поперечные габариты системы.

Таким образом, ОПИИС с объективом переменного фокусного расстояния может служить альтернативной заменой двух- и более канальной ОПИИС, в зависимости от предъявляемых требований, обеспечивая высокое качество изображения.

### Выводы по главе 3

Вышерассмотренные ОПФР удовлетворяют требуемому качеству изображения, которое необходимо при использовании камеры ОПИИС, в данном случае матрицы *SONY*. Первые два объектива с восьмикратным перепадом фокусного расстояния имеют одинаковые оптические характеристики:  $f'=25\dots 200$  мм,  $D/f'=1/4$ ,  $\lambda=0,600\dots 0,800$  мкм,  $2\omega=3,7^\circ\dots 29,1^\circ$  и разные конструктивные особенности. Так в первом случае знаки компонентов ОС выбраны как «+», «-», «+», «+», объектив имеет одну асферическую линзу, что делает объектив дороже, диаметры линз компонентов объектива больше, чем во втором случае, однако вес оптической системы (стекла без оправ) отличается лишь на 10 г. Также объектив термически скомпенсирован при использовании титанового корпуса для перепада температур от  $-60^\circ\text{C}$  до  $+60^\circ\text{C}$ .

Во втором случае знаки компонентов ОС выбраны как «+», «-», «-», «+». Закон движения компонентов выбран так, что второй компонент в определенный момент движется по пути третьего компонента.

Первые два объектива имеют характеристики, близкие к дифракционным.

Другие два объектива – двадцатикратные объективы с переменным фокусным расстоянием со следующими оптическими характеристиками:  $\lambda=0,600\dots0,850$  мкм,  $D/f'=1/4$ , для первого случая –  $f'=15\dots300$  мм,  $2\omega=2,0^\circ\dots36^\circ30'$ , для другого –  $f'=17\dots350$  мм и  $2\omega=2,1^\circ\dots42^\circ$  соответственно.

Первый из двадцатикратных объективов – четырехкомпонентный, имеет следующие знаки компонентов: «+», «-», «+», «+», содержит 12 линз, из которых 2 асферические линзы и 3 склейки. Объектив имеет хорошее качество – среднеквадратическое отклонение волнового фронта менее 0,1 отн.ед. Длина объектива составляет 220 мм, диаметр первого компонента 90 мм. Вес оптической системы объектива отличается от двух предыдущих на 130 г, что связано с использованием стекол с низкой дисперсией особенно в первом компоненте, таких как СТК119 и ТФ110. Закон движения компонентов системы выбран как и во втором восьмикратном объективе. Виньетирование при  $2\omega=36^\circ30'$  составляет около 13%. Недостатки системы – вес и большой диаметр первого компонента – можно устранить либо уменьшением диаметра первого компонента, за счет увеличения виньетирования системы, либо за счет увеличения количества подвижных компонентов.

Другой из двадцатикратных объективов – шестикомпонентный, имеет следующие знаки компонентов: «+», «-», «-», «+», «-», «+». Объектив имеет хорошее качество – среднеквадратическое отклонение волнового фронта менее 0,1 отн.ед. Длина объектива отличается от двух восьмикратных объективов на 2 мм. Вес оптической системы объектива отличается от первого восьмикратного объектива лишь на 6 г. Конструктивно объектив имеет сходство с первым и вторым объективами: в объективе присутствуют две асферические линзы, закон движения компонентов выбран так, что пары компонентов движутся навстречу друг другу, компонент из каждой пары движется по пути другого компонента из этой пары. Кроме того, при минимальном поле зрения объектива, т.е. при фокусном расстоянии  $f'=350$  мм, виньетирование осевого пучка составляет 10,5%, что уменьшает относительное отверстие с 1:4 до 1:4,5, что не критично. Следует отметить, что увеличение

количества подвижных компонентов связано с сохранением габаритов и увеличением коррекционных возможностей объектива.

В целом, характеристики рассмотренных объективов позволяют их использовать для камеры ОПИИС в зависимости от требований.

Основные выводы к третьей главе могут быть сформулированы следующим образом:

1. По предлагаемой методики был проведен габаритный расчет оптической системы с переменным фокусным расстоянием. В зависимости от полученного относительного отверстия компонента  $D/f'$  осуществлялся переход к линзам конечной толщины, и далее добавлялись коррекционные элементы.

2. Используя отечественные марки стекол, в программе *Zemax* спроектирован восьмикратный объектив с переменным фокусным расстоянием для матрицы *SONY*. Объектив состоит из четырех компонентов, имеющих знаки «+», «-», «+», «+», содержит 12 линз, из которых 4 склейки и 1 асферика. Имеет хорошие оптические характеристики, термоскомпенсирован.

3. Используя отечественные марки стекол, в программе *Zemax* спроектирован восьмикратный объектив с переменным фокусным расстоянием для матрицы *SONY*. Объектив состоит из четырех компонентов, имеющих знаки «+», «-», «-», «+», имеет 12 линз, из которых 3 склейки. Имеет хорошие оптические характеристики, меньшие диаметры линз компонентов объектива из трех вышерассмотренных.

4. Используя отечественные марки стекол, в программе *Zemax* спроектирован двадцатикратный объектив с переменным фокусным расстоянием для матрицы *SONY*. Объектив состоит из четырех компонентов, имеющих знаки «+», «-», «+», «+», имеет 12 линз, из которых 3 склейки и 2 асферики. Имеет хорошие оптические характеристики во всем диапазоне изменения фокусного расстояния. При фокусном расстоянии  $f'=300$  мм, виньетирование внеосевого пучка составляет около 13%. Отличается от трех других объективов бóльшим весом и поперечными габаритами, и меньшими продольными габаритами.

5. Используя отечественные марки стекол, в программе *Zemax* спроектирован двадцатикратный объектив с переменным фокусным расстоянием для матрицы *SONY*. Объектив состоит из шести компонентов, имеющих знаки «+», «-», «-», «+», «-», «+», содержит 14 линз, из которых 5 склеек и 2 асферики. Имеет хорошие оптические характеристики во всем диапазоне изменения фокусного расстояния. При фокусном расстоянии  $f^*=350$  мм, виньетирование осевого пучка составляет 10,5%, а относительное отверстие  $D/f'$  уменьшается с 1:4 до 1:4,5, что не критично.

6. Приведены сравнительные таблицы двухканальной ОПИИС и ОПИИС с объективами переменного фокусного расстояния. Характеристики объективов переменного фокусного расстояния позволяют их использовать для камеры ОПИИС, что служит альтернативной заменой двухканальной ОПИИС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью настоящей диссертационной работы являлось повышение функциональных характеристик обзорно-поисковой информационно-измерительной системы (ОПИИС) за счет применения телевизионной камеры с объективом переменного фокусного расстояния, обеспечивающим высокое качество изображения. В ходе работы были решены следующие задачи:

1. проанализирована двухканальная телевизионная ОПИИС, состоящая из разработанного и запатентованного объектива для ближней ИК-области спектра (патент РФ 2690098) и разработанного термостабилизированного объектива видимой и ближней ИК-области спектра. Выявлены достоинства и недостатки двухканальной ОПИИС, предложена одноканальная ОПИИС с объективом переменного фокусного расстояния;

2. выполнен обзор и анализ существующих объективов с переменным фокусным расстоянием;

3. проанализированы существующие методы синтеза оптических систем с переменным фокусным расстоянием;

4. разработана математическая модель, описывающая трех- и четырехкомпонентную оптическую систему переменного фокусного расстояния в параксиальной области, с учетом ограничений, применяемых к этой системе, и решаемая методом вариации параметров;

5. разработан алгоритм и реализована программа синтеза исходной трех- и четырехкомпонентной оптической системы с переменным фокусным расстоянием;

6. разработана методика расчета  $n$ -компонентной ОСПФР, с помощью которой выполнялся синтез оптической системы. После чего, осуществлялся переход от полученных параксиальных компонентов к реальным, учитывая относительные отверстия компонентов  $D/f$  и далее – переход от среды *Model* к реальным стеклам. Затем добавлялись коррекционные элементы. Предложенная методика расчета, упрощает работу расчетчика, позволяя продолжать

проектирование системы в этой программе, либо рассматривать другие варианты конструкции системы;

7. проведена верификация разработанной методики расчета на примере объективов с переменным фокусным расстоянием для телевизионной камеры ОПИИС.

В работе была предложена двухканальная телевизионная оптическая система наблюдения ОПИИС, включающая разработанный и запатентованный нами объектив для ближней ИК-области спектра (патент РФ 2690098) [3] фиксированного фокусного расстояния и разработанный термостабилизированный объектив видимой и ближней ИК-области спектра [4] фиксированного фокусного расстояния. Объективы термостабилизированы и имеют качество, близкое к дифракционному. Т.о. двухканальная телевизионная ОПИИС имеет хорошие функциональные характеристики, что позволяет эффективно решать задачи по обнаружению, опознаванию и идентификации предмета даже в сумеречное время суток, к достоинству также можно отнести возможность независимой настройки, юстировки и диагностики каждого канала. К недостаткам относятся сложность совмещения оптических осей отдельных каналов [33, 34], массогабаритные параметры и стоимость. Поэтому была предложена одноканальная телевизионная ОПИИС. В качестве телевизионного канала ОПИИС был выбран объектив переменного фокусного расстояния, что позволило бы улучшить функциональные характеристики ОПИИС, за счет расширения характеристик оптической системы.

Однако в настоящее время нет единых методов проектирования объективов с переменным фокусным расстоянием, отсутствует систематизация, рассмотренные методы содержат трудоемкий математический расчет, а также нет возможности заимствования, т.к. методы описываются не в полном объеме (пошагово). Поэтому была разработана методика расчета  $n$ -компонентной оптической системы с переменным фокусным расстоянием, в которую входит предложенный алгоритм структурно-габаритного синтеза исходной системы, на



основе разработанной математической модели, решаемой методом вариации параметров. Алгоритм был реализован в программе расчета оптических систем.

Т.о. были получены два восьмикратных и два двадцатикратных объектива с переменным фокусным расстоянием ОПИИС.

Первые два объектива с восьмикратным перепадом фокусного расстояния имеют одинаковые характеристики –  $f'=25\dots200$  мм,  $D/f'=1/4$ ,  $\lambda=0,600\dots0,800$  мкм,  $2\omega=3,7^\circ\dots29,1^\circ$ , и разные конструктивные особенности. Так в первом случае знаки компонентов оптической системы выбраны как «+», «-», «+», «+», объектив имеет одну асферическую линзу, что делает объектив дороже, диаметры линз компонентов объектива больше, чем во втором случае, однако вес оптической системы (стекла без оправ) отличается лишь на 10 г. В среднем вес системы составляет менее 700 г. Также объектив термически скомпенсирован при использовании титанового корпуса для перепада температур от  $-60^\circ\text{C}$  до  $+60^\circ\text{C}$ .

Во втором случае знаки компонентов оптической системы выбраны как «+», «-», «-», «+». Закон движения компонентов выбран так, что второй компонент в определенный момент движется по пути третьего компонента. Первые два объектива имеют качество, близкое к дифракционному.

Другие два полученных объектива имеют следующие характеристики –  $\lambda=0,600\dots0,850$  мкм,  $D/f'=1/4$ , для первого случая –  $f'=15\dots300$  мм,  $2\omega=2,0^\circ\dots36^\circ30'$ , для другого –  $f'=17\dots350$  мм и  $2\omega=2,1^\circ\dots42^\circ$  соответственно.

Первый из двадцатикратных объективов – четырехкомпонентный, имеет две асферики и следующие знаки компонентов: «+», «-», «+», «+». Закон движения компонентов системы выбран такой же, как и во втором восьмикратном объективе. Виньетирование при  $2\omega=36^\circ30'$  составляет около 13%. Отличается от трех других объективов большим весом и поперечными габаритами, и меньшими продольными габаритами.

Другой из двадцатикратных объективов – шестикомпонентный, имеет две асферики и следующие знаки компонентов: «+», «-», «-», «+», «-», «+». Длина объектива отличается от двух восьмикратных объективов на 2 мм. Вес

оптической системы объектива отличается от первого восьмикратного объектива лишь на 6 г. Конструктивно объектив имеет сходство с первым и вторым объективами: в объективе присутствуют две асферические линзы, закон движения компонентов выбран так, что пары компонентов движутся навстречу друг другу, компонент из каждой пары движется по пути другого компонента из этой пары. Кроме того, при минимальном поле зрения объектива, т.е. при фокусном расстоянии  $f=350$  мм, виньетирование осевого пучка составляет 10,5%, что уменьшает относительное отверстие с 1:4 до 1:4,5, что не критично.

Следует отметить, что увеличение количества подвижных компонентов связано с сохранением габаритов и увеличением коррекционных возможностей объектива.

Оба объектива имеют хорошее качество – среднеквадратическое отклонение волнового фронта менее 0,1 отн.ед.

В целом, характеристики рассмотренных объективов позволяют их использовать для камеры ОПИИС.

Таким образом, были достигнуты поставленные цели и решены задачи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русинов М.М. Техническая оптика: Учеб. Пособие для вузов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979, ил. – 488 с.
2. Острун А.Б. Разработка методов автоматизированного синтеза оптических систем переменного увеличения в гауссовой области. Дис. канд. техн. наук: 05.11.07: Санкт-Петербург, 2014, 104 с.
3. Пат. 2690098 РФ Объектив для ближней ИК-области спектра. МПК<sup>9</sup> G02B 13/14; G02B 9/12; G02B 11/16; заявитель и патентообладатель: Акционерное общество "Конструкторское бюро приборостроения им. академика А.Г. Шипунова"/ Бушмелев Н.И., Горячева В.А. [и др.] - №2018135891; заявл. 11.10.2018; опубл. 30.05.2019, Бюл. № 16.
4. Горячева В.А., Мазаев В.Л. Термостабилизированный объектив видимой и ближней инфракрасной области спектра. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 8. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019, стр. 298 – 303.
5. Гаршин А.С. Исследование и разработка многоспектральных оптических систем с одновременной работой каналов. Дис. канд. техн. наук: 05.11.07: Санкт-Петербург, 2016. - 150 с.
6. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1969. – 670 с.
7. Русинов М.М. Композиция оптических систем. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 383 с.
8. Бахолдин А.В., Романова Г.И., Цуканова Г.И. Теория и методы проектирования оптических систем. Часть I. Учебное пособие под ред. проф. А.А. Шехонина. Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО, 2011, 105 с.
9. Горячева В.А. Проектирование объективов с переменным фокусным расстоянием. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 6. Тула: Изд-во ТулГУ, 2020, стр. 28 – 30.

10. M.J. Kidger. Intermediate optical design. p. cm. SPIE Press monograph; PM134. 2004, 227 p.
11. Пахомов И.И. Панкратические системы. М., «Машиностроение», 1976, 160 с.
12. M. Laikin. Lens design. 4<sup>th</sup> ed. p.cm. Optical science and engineering series, 121. 2006, 512 p.
13. Волосов Д.С. Фотографическая оптика: Теория, основы проектирования, оптические характеристики. Учебное пособие для киновузов. 2-е изд. М.: Искусство, 1978, 543 с.
14. Патент 2289833 РФ. Вариообъектив/ Н.Е. Кунделева, В.А. Марчик. Оpubл. 20.12.2006.
15. Патент 2262727 РФ. Вариообъектив/ Н.Е. Кунделева, В.А. Марчик, А.М. Агзамов. Оpubл. 20.10.2005.
16. EF Lens Work III. The Eyes of EOS. September 2006, eight edition. Canon Inc. Lens Products Group, pp.162-166.
17. Куртман 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.
18. Пахомов И.И., Пискунов Д.Е., Фролов М.Е., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф. Автоматизированный габаритный расчет вариообъективов. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, сер. Приборостроение, 2010, с. 316-320.
19. Antonin Miks, Jiri Novak, Pavel Novak. Method of zoom lens design. Applied optics. Vol. 47, no 32, 2008, pp.6088-6098.
20. Pegis R.J. First-order design theory for linearly compensated zoom systems. JOSA, 1962, vol. 52, pp. 905–911.
21. Горячева В.А. Обзор панкратических объективов для телевизионных систем. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 9: в 2 ч. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017, стр. 202 – 210.

22. Jae Myung Ryu, Jeong Hyo Oh, and Jae Heung Jo. Unified analytic calculation method for zoom loci of zoom lens systems with a finite object distance. *Journal of the Optical Society of Korea*. Vol. 18, No. 2, April 2014, pp. 134-145.

23. Pal S., Hazra L. N. A novel approach for structural synthesis of zoom systems// *Proc. SPIE* Vol. 7786, pp. 778607-1 – 778607-11, 2010.

24. Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф. Современные методы расчета вариообъективов. *Современные проблемы оптотехники: сборник статей / сост. Барышников Н. В. - М., 2013. - (Труды / МГТУ им. Н. Э. Баумана; № 610), с. 250-262.*

25. Бездидько С.Н., Ширанков А.Ф. Структурно-габаритный синтез исходных схем оптических систем. *Оптический журнал*. Том 86, номер 9. Изд-во: ИТМО, 2019, с. 17-24.

26. Горячева В.А., Мазаев В.Л. Макрос для моделирования наклона зеркала в программе *Zemax*. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. Вып. 7. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019, стр. 210 – 212.

27. Горячева В.А., Мазаев В.Л. Программа расчета основных характеристик компонентов оптической системы в *Zemax*. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. Вып. 7. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019, стр. 194 – 199.

28. Горячева В.А. Расчет оптических сил компонентов панкратического объектива в *Zemax*. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. Вып. 6. Тула: Изд-во ТулГУ, 2020, стр. 143 – 146.

29. Фильчаков П.Ф. Численные и графические методы прикладной математики. Справочник – Киев: Наукова думка, 1970, 800 с.

30. Горячева, В. А. Объектив с переменным фокусным расстоянием = Zoom lens / В. А. Горячева // *Приборостроение-2022: материалы 15-й Международной научно-технической конференции, 16-18 ноября 2022 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]*. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 85-87.

31. Цуккерман С.Т. Точные механизмы. – М.: Оборонгиз, 1941, 306 с.
32. Warmigsheim. SMPTE. 1932, т.19, №4, стр. 329-339.
33. Бардин А.Н. Сборка и юстировка оптических приборов. – М.: Высшая школа, 1968, 328 с.
34. Новик Ф.С., Ногин П.А. Киносъёмочная оптика. – М.: Искусство, 1968, 408 с.
35. Плотников В.С. и др. Расчёт и конструирование оптико-механических приборов. – М.: Машиностроение, 1972 - 255 с.
36. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. – Л.: Машиностроение, 1968, – 564 с.: ил., табл.
37. Литвин Ф.Л. Проектирование механизмов и деталей приборов. – Л.: Машиностроение, 1973, 696 с.
38. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. – Л.: Машиностроение, 1968, 237 с.
39. Крынин Л.И. Проектирование конструкций объективов. – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 219 с.
40. Крынин Л. И Основы проектирования и юстировки объективов переменного фокусного расстояния. Учебное пособие – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 124 с.
41. Chun Kan T. Design of zoom system by the varifocal differential equation. Applied Optics, 1992, vol. 31, no. 13, pp. 2265–2273.
42. Погорельский С.Л. Прикладная оптика. Курс лекций: учебн. пособие для вузов/ С.Л. Погорельский; ТулГУ – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010.- 253 с.
43. Бетенски Э., Хопкинс Р., Шеннон Р. И др. Проектирование оптических систем: Пер. с англ./ Под ред. Шеннона Р., Вайанта Дж. – М.: Мир, 1983. – 432 с.
44. Русинов М.М., Грамматин А.П. и др. Под общ. ред. Русинова М.М. Вычислительная оптика: Справочник – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1984 – 423 с.

45. Малькин А.А. Разработка методики проектирования оптических систем с использованием ограниченного набора марок стёкол. Дис. канд. техн. наук: 05.11.07: Москва, 2015. – 173 с.

46. Цыганюк Е.А. Исследование и разработка линзовых объективов, работающих в широкой области спектра. Дис. канд. техн. наук: 05.11.07: Санкт-Петербург, 2012. – 107 с.

47. Панов В.А., Кругер М.Я., Кулагин В.В. и др. Под общ. ред. Панова В.А. Справочник конструктора оптико-механических приборов. – 3-е изд. перераб., и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980. – 742 с.

48. M.J. Kidger. Fundamental optical design. p. cm. SPIE Press monograph; PM92, 2002, 290 p.

49. W.J. Smith. Modern optical engineering. The design of optical systems. 4<sup>th</sup> ed 2008. – 764 p.

50. Шпякин М.Г. Современные тенденции развития панкратических объективов, Тр. ГОИ, т.46, вып.180, 1980, с.94 – 110.

51. Качурин Ю.Ю., Крюков А.В., Кананыхин О.А. Особенности использования программы ZEMAX при анализе оптических систем. Методы и средства научных исследований. Материалы конференции-семинара. Москва, 2020. с. 17-19.

52. Поспехов В.Г., Дягилева А.В., Мельникова Е.М. Панкратический объектив, включающий группу с заданными свойствами. Тр. Междунар. конф. «Прикладная оптика 2010», т. 1, с. 74–79.

53. Хацевич Т.Н., Дружкин Е.В. Исследование объективов для малогабаритных тепловизионных приборов с позиции модели двухкомпонентного объектива. Вестник СГУГиТ, том 23, №2, 2018, с.245 – 261.

54. Толстоба Н.Д., Цуканов А.А. Проектирование узлов оптических приборов. Учебное пособие. – СПб, 2002. – 128с.

55. Рожков О.В., Пискунов Д.Е., Носов П.А., Павлов В.Ю., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф. «Особенности теории и практики научной

школы МГТУ им. Н.Э. Баумана «Разработка вариосистем». Компьютерная оптика, том 42, №1, 2018, с. 72 – 83.

56. Грейсух, Г.И., Ежов Е.Г., Антонов А.И. Коррекция хроматизма вариообъективов среднего ИК-диапазона / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, А.И. Антонов // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 4. – с. 544-549.

57. ZEMAX Optical Design Program. User's Guide. Version February 22, 2008. ZEMAX Development Co., 2008, 732 p.

58. Johnson J. and Lawson W. "Performance Modeling Methods and Problems", Proceedings of IRIS Specialty Groups on Imagery, January 1974.

59. Volimerhausen R., Jacobs E., Driggers R. New metric for predicting target acquisition performance. U.S. Army Communications and Electronics 105 Command Night Vision and Electronic Sensors Directorate, Fort Belvoir. 2003

60. Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами. Сборник статей и докладов по материалам ежегодной научно-практической конференции. Коломна, 2016 г. Логинов А.А. Оценка разведывательных возможностей БЛА, с.153-158.

61. Письменный Д.Т. Конспект лекций по теории вероятностей и математической статистике. - М.: Айрис-пресс, 2004. - 256 с.

62. Harney R.C. "Practical issues in multisensor target recognition," in Proceedings of the Third National Symposium on Sensor Fusion, 1990, pp. 105- 114.

63. Поспехов В.Г., Крюков А.В. Исследование и расчет малогабаритного панкратического объектива перископического типа. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/826.html>







## Акт

## О внедрении результатов диссертационной работы

Настоящим удостоверяется, что результаты диссертационной работы Горячевой Варвары Александровны «Объектив с переменным фокусным расстоянием для телевизионной камеры обзорно-поисковой информационно-измерительной системы» использованы в секторе «Конструирование и расчет оптических систем» отдела «Оптические системы и приборы управления» при проведении научно-исследовательских работ по тематике отдела.

Предложенная в работе методика расчета  $n$ -компонентного объектива с переменным фокусным расстоянием телевизионной камеры обзорно-поисковой информационно-измерительной системы обладает научной новизной, является основой для проектирования объектива с переменным фокусным расстоянием обзорно-поисковой информационно-измерительной системы, позволяет сократить время на затраты при проектировании.

В настоящее время по результатам работы рассматривается возможность проведения исследовательских работ по проектированию объектива с переменным фокусным расстоянием телевизионной камеры обзорно-поисковой информационно-измерительной системы с целью улучшения функциональных характеристик обзорно-поисковой информационно-измерительной системы и сокращения сроков создания новых перспективных изделий.

Директор отраслевых направлений



В.Е. Семашкин

Начальник отделения 5

А.В. Чинарев