

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

## КОНСТРУИРОВАНИЕ, ЮСТИРОВКА И МЕТРОЛОГИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

*Под редакцией доктора технических наук, профессора С. М. Латыева*

### СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
<b>ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ</b>	
Латыев С. М., Смирнов А. П., Табачков А. Г., Фролов Д. Н., Шухат Р. В. Проект линии автоматизированной сборки микрообъективов.....	7
Латыев С. М., Табачков А. Г., Фролов Д. Н., Резников А. С. Унификация оптических и механических конструкций линзовых микрообъективов .....	14
Смирнов А. П., Латыев С. М. Математическая модель автоматизированной сборки микрообъективов.....	22
Смирнов А. П., Резников А. С., Абрамов Д. А. Автоматизированный пересчет оптических схем при конструировании .....	28
<b>МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ</b>	
Иванов А. Н., Каракулев Ю. А., Михайлов В. М. Алгоритм измерения геометрических параметров объекта по его муар-интерференционной картине ....	33
Бурбаев А. М., Зюзин В. В., Лукин М. Г., Марусов С. А., Мищенко В. И. Применение дисперсионного элемента при настройке интерферометров типа Цендера — Маха.....	37
Разумовский И. Т. Пирометр для контроля перегрева скруток проводов линий электропередач .....	43
Иванов А. Н. Контроль геометрических параметров объекта по положению точек перегиба дифракционной картины Фраунгофера .....	49
Назаров В. Н., Соколов Ю. А. Дифракционный метод контроля пространственного положения объектов с изменяющимся масштабом спектра Фурье.....	53

<b>Польщиков Г. В., Шевнина Е. И., Фам Шон Лам, Шалыгина Н. В.</b> Использование режима теплового хранения термоупругого преобразователя для построения многоканальных измерительных систем.....	56
<b>Роженцов В. В., Мамедов Р. К.</b> Гониоспектрорадиометрический метод определения пространственных спектральных характеристик локальных световых полей.....	60
<b>КОНСТРУКЦИИ И СИСТЕМЫ ТОЧНЫХ ПРИБОРОВ</b>	
<b>Абакшина О. А., Егоров Г. В., Латыев С. М., Митрофанов С. С.</b> Модернизация конструкций фотоэлектрических индикаторов линейных перемещений.....	65
<b>Назаров В. Н., Иванов А. Н.</b> Формирование муар-интерференционной картины при дифракции на щели между краем с конечной толщиной и зеркальной поверхностью .....	69
<b>Бурбаев А. М., Леонтьева А. И., Одиноких Г. А., Френкель Д. А.</b> Применение инвариантных оптических систем в схемах контроля и юстировки ОЭП.....	72
<b>Ишанин Г. Г., Польщиков Г. В., Шевнина Е. И.</b> Использование френелевских ответвителей при построении проходных измерителей энергетических параметров лазерного излучения .....	79
SUMMARY ( <i>перевод Ю. И. Копилевича</i> ).....	84

## THEMATIC ISSUE

# DESIGN, ADJUSTMENT, AND METROLOGY OF OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS

*By Edition of S. M. Latyev, Doctor of Technical Science, Professor*

## CONTENTS

PREFACE.....	5
<b>PRINCIPLES OF OPTICAL INSTRUMENTS DESIGN</b>	
<b>Latyev S. M., Smirnov A. P., Tabachkov A. G., Frolov D. N., Shukhat R. V.</b> Design of Automated Assembly Line for Microscop Lens.....	7
<b>Latyev S. M., Tabachkov A. G., Frolov D. N., Reznikov A. S.</b> Unification of Optical and Mechanical Design of Lens Microobjectives .....	14
<b>Smirnov A. P., Latyev S. M.</b> Mathematical Model of Automated Assembly of Microlenses.....	22
<b>Smirnov A. P., Reznikov A. S., Abramov D. A.</b> Automated Recalculation of Optical Scheme in Instrument Design.....	28
<b>METROLOGICAL CONTROL AND MEASUREMENT OF MECHANICAL QUANTITIES WITH OPTICAL METHODS</b>	
<b>Ivanov A. N., Karakulev Yu. A., Mikhailov V. M.</b> Algorithm for Object Geometrical Parameters Determination by Moiré Fringe Pattern.....	33
<b>Burbaev A. M., Zyuzin V. V., Lukin M. G., Marusov S. A., Mischenko V. I.</b> Application of a Dispersive Element for Adjustment of Zehnder — Mach Interferometer.....	37
<b>Razumovsky I. T.</b> Pyrometer for Inspection of Wires Twisting in Electric Mains.....	43
<b>Ivanov A. N.</b> Control Over Geometrical Parameters of an Object by Location of Inflection Points in Fraunhofer Diffraction Pattern .....	49
<b>Nazarov V. N., Sokolov Yu. A.</b> Diffraction Method of Control over Spatial Position of Objects with Variable Scale of Fourier Spectrum .....	53
<b>Polshchikov G. V., Shevnina E. I., Pham Son Lam, Shalygina N. V.</b> Application of Thermal Storage Mode to Thermoelastic Converter Used in Multichannel Measuring Systems.....	56
<b>Rozhentsov V. V., Mamedov R. K.</b> Goniospectroradiometric Method for Determination of Spatial Spectral Characteristics of Local Light Fields .....	60

## CONSTRUCTIONS AND SYSTEMS OF PRECISION INSTRUMENTS

<b>Abakshina O. A., Egorov G. V., Latyev S. M., Mitrofanov S. S.</b> Modernized Design of Photoelectric Indicator of Linear Movements.....	65
<b>Nazarov V. N., Ivanov A. N.</b> Moiré-Interference Pattern Formation on Diffraction at Clearance between Edge of Finite Thickness and Reflecting Surface.....	69
<b>Burbaev A. M., Leontieva A. I., Odinokikh G. A., Frenkel D. A.</b> Application of Invariant Optical Systems in Optical Instrument Control and Adjustment Schemes .....	72
<b>Ishanin G. G., Polshchikov G. V., Shevnina E. I.</b> Application of Fresnel Dividers in Design of Passage Detectors of Laser Radiation Power .....	79
SUMMARY .....	84

*Editor-in-Chief E. B. Yakovlev*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящем тематическом выпуске журнала представлены работы научно-педагогической школы „Научные основы конструирования и юстировки оптико-электронных приборов“ кафедры компьютеризации и проектирования оптических приборов Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (СПбНИУ ИТМО).

Направления научных исследований кафедры сосредоточены на разработке теоретических основ и принципов конструирования оптических приборов, обеспечивающих такие важнейшие показатели качества проектируемых приборов и устройств, как точность, надежность и технологичность, а также создании теории и методов их юстировки и метрологического контроля.

Прикладные аспекты научной и опытно-конструкторской деятельности коллектива связаны с исследованием точности функционирования изделий; проектированием нестандартного контрольно-юстировочного и измерительного оборудования; созданием методов юстировки, контроля и испытания оплотехники; автоматизацией сборочно-юстировочных процессов изготовления оптических узлов и функциональных устройств приборов.

*Доктор технических наук, профессор  
С. М. ЛАТЫЕВ*

## PREFACE

This thematic issue of the Journal presents papers by members of scientific-pedagogical school “Scientific fundamentals of design and adjustment of opto-electronic instruments” at Department of Optical Instruments Computerization and Design of St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics.

The principle lines of investigations carried out at the Department includes development of theoretical basis and fundamentals of optical instruments design ensuring the main indicators of quality of instruments and systems like accuracy, reliability, and manufacturability, as well as creation of theory and methods for the instruments adjustment and metrological control.

Applied aspects of scientific activities and developments performed by the department staff are related to study of accuracy of product functioning; development of nonstandard control, adjustment, and measuring equipment; creation of methods for instruments adjustment, control, and testing; automation of assembly and adjustment procedures in manufacturing of optical modules and functional units of opto-electronic instruments.

*Doctor of Technical Science, Professor  
S. M. LATYEV*

---

---

# ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

---

---

УДК 681.4.07

С. М. ЛАТЫЕВ, А. П. СМИРНОВ, А. Г. ТАБАЧКОВ, Д. Н. ФРОЛОВ, Р. В. ШУХАТ

## ПРОЕКТ ЛИНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ МИКРООБЪЕКТИВОВ

Рассматриваются проблемы и концепция построения линии автоматизированной сборки, юстировки и контроля качества серийных микрообъективов.

*Ключевые слова:* микрообъектив, сборка, автоматизация, юстировка, контроль.

**Введение.** В настоящее время большинство фирм, производящих оптические приборы и системы, занимаются исследованиями, связанными с автоматизацией сборки их оптико-механических и оптико-электронных устройств и узлов. Автоматизация процесса сборки таких изделий — весьма сложная задача. Это обусловлено тем, что отклонения характеристик материалов оптических деталей, погрешности их изготовления (размеров, формы рабочих и базовых поверхностей), а также погрешности „механических“ деталей не позволяют достичь необходимых целевых показателей качества изготавливаемых устройств. Для устранения или компенсации влияния погрешностей на показатели качества собираемых узлов требуется их юстировка, которая обычно выполняется „вручную“ и является наиболее трудоемкой операцией сборки.

Для проведения необходимых исследований по автоматизации сборки оптических устройств, а также подготовки квалифицированных специалистов в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО) в рамках инновационных образовательных программ (с участием сотрудников Технического Университета Ильменау, Германия, и ряда оптических фирм) создана учебно-научная лаборатория и разрабатывается линия автоматизации сборки микрообъективов [1—3].

Выбор именно микрообъективов (МО) при разработке линии автоматизированной сборки обусловлен тем, что они производятся относительно большими сериями, кроме того, трудоемкость сборки МО очень высока, так как они являются одними из наиболее сложных линзовых систем, создающих изображение на уровне дифракционного (разрешающая способность  $\varepsilon = \lambda / (2A)$ , где  $\lambda$  — длина волны света,  $A$  — числовая апертура объектива).

**Концепция построения линии автоматизированной сборки микрообъективов.** Процесс автоматизированной сборки МО требует:

- унификации их конструкций;
- разработки технологического процесса сборки, исключаящую дополнительную обработку деталей резанием и многократные процессы сборки-разборки;
- разработки методов контроля и обеспечения показателей качества МО на основе использования современных информационных средств и технологий.

Рассмотрим основные аспекты разработанной концепции.

**Унификация конструкций микрообъективов.** Создание автоматизированной линии сборки МО затруднено существующим разнообразием их конструкций вследствие необходимости переналадок сборочных станций и применения специальной оснастки для каждого вида конструкций. Кроме того, в большинстве типовых конструкций МО базовые внутренние цилиндрические поверхности их несущих (корпусных) деталей являются полуоткрытыми. Данное обстоятельство затрудняет контроль базового цилиндра и позволяет осуществлять сборку компонентов и доступ к ним только с одной стороны, что ограничивает гибкость процесса автоматизированной сборки.

При унификации конструкций МО необходимо учитывать их структуру, конфигурацию компонентов, виды, форму и размеры деталей, высоту МО, расчетную длину тубуса, технологии сборки и контроля. На рис. 1 представлена базовая конструкция микрообъектива из разработанного унифицированного ряда (унифицированной линейки) наиболее востребованных типов МО (более подробно см. работы [4, 5]).

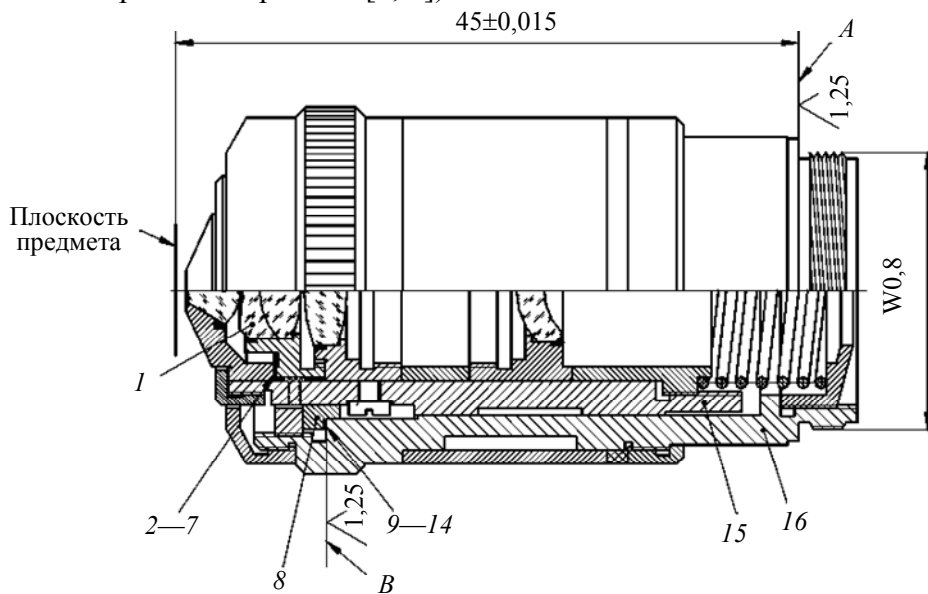


Рис. 1

В унифицированной конструкции внутреннее базовое цилиндрическое отверстие несущей детали 15, в целях улучшения контроля и сборки компонентов, выполнено сквозным, а для обеспечения некоторых показателей качества МО (см. далее) предусмотрены не только коррекционные прокладные кольца 2—7, но и 9—14.

Коэффициент применяемости механических деталей для унифицированной линейки из шести базовых конструкций МО, использование которых позволяет собрать порядка 370 различных МО, определяется как

$$K = [(N_{\Sigma} - N) / N_{\Sigma}] \cdot 100 \% = 64 \dots 100 \%,$$

где  $N_{\Sigma}$  — общее количество типоразмеров деталей,  $N$  — количество типоразмеров оригинальных деталей.

**Технологические погрешности элементов, влияющие на целевые показатели качества микрообъективов.** Отклонения показателей преломления материалов линз ( $\Delta n_e$ ) и погрешности изготовления (толщин ( $\Delta d$ ), воздушных промежутков ( $\Delta t$ ), радиусов кривизны рабочих поверхностей ( $\Delta R$ )) приводят в собранном микрообъективе к сферической аберрации, которая обычно устраняется путем подрезки торца оправы одного из компонентов или подборки необходимой толщины коррекционного прокладного кольца (поз. 2—7 на рис. 1), что требует повторных процессов разборки и сборки МО.



Указанные погрешности, а также погрешности изготовления других деталей МО (например, корпуса) не позволяют обеспечить высоту МО (расстояние от опорного торца корпуса до плоскости предмета) с необходимой точностью, гарантирующей отсутствие недопустимых расфокусировок создаваемого изображения, что требует подрезки опорного торца *A* корпуса *16* или торца *B* кольца *8*. Погрешности расположения центров кривизны рабочих поверхностей линз (децентрировки) относительно оси базового цилиндра *15* приводят к появлению aberrации „кома“, для уменьшения которой обычно применяется результирующая обработка (проточка) оправ компонентов от их оптических осей [6]. В случаях когда в собранном объективе (как правило, в объективах, имеющих большое увеличение и апертуру) наблюдается кома, то ее устраняют (компенсируют) путем сдвига одного из компонентов (поз. *1*) МО перпендикулярно оси через отверстия в цилиндре *15*. Несоосность оптической оси МО и его базовой (механической) оси (оси резьбового цилиндра корпуса, перпендикулярной торцу *A*) приводит к радиальному смещению изображения. Допустимое значение этого смещения (равное половине поля зрения окуляра или половине приемной площадки матрицы ПЗС), а также высота МО обеспечиваются, при обычной технологии сборки, результирующей (от оптической оси) подрезкой торца *A* при наклоне корпуса объектива с помощью специального патрона [6].

**Адаптивно-селективная сборка микробиъективов.** При автоматизированной сборке МО желательно исключить многократные процессы разборки и сборки, а также дополнительную обработку деталей (особенно резанием) в процессе монтажа. В связи с этим сборка МО осуществляется на основе адаптивной селекции и сборке его компонентов с учетом измеренных погрешностей конструктивных параметров узлов и деталей МО. Адаптивно-селективная сборка, принципиальная схема которой представлена на рис. 2, отличается от обычной селективной сборки тем, что на основе результатов измерения погрешностей изготовления деталей и узлов производится не только их комплектация, но и корректировка процесса сборки деталей, а при необходимости и их изготовления.

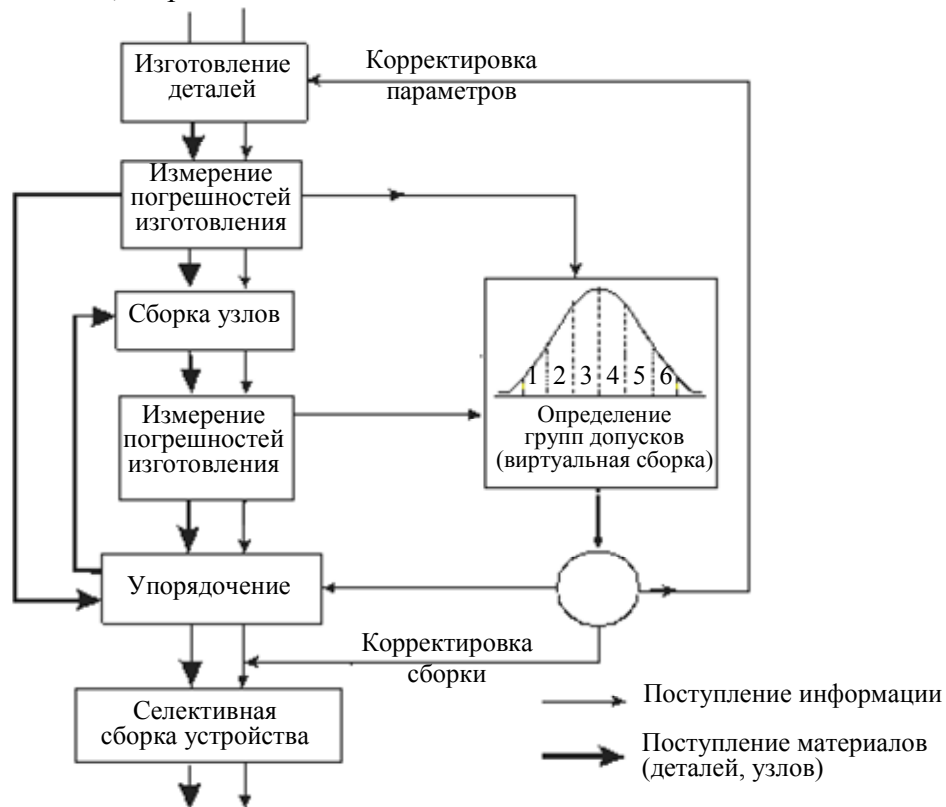


Рис. 2

Использование значений измеренных погрешностей позволяет осуществить виртуальную сборку МО путем подбора его элементов таким образом, чтобы обеспечить требуемое качество, устранив или уменьшив число юстировочных операций. Естественно, что виртуальная сборка должна основываться на математических моделях и алгоритмах, связывающих первичные погрешности с требуемыми показателями качества [7].

Чертеж компонента микрообъектива с перечнем измеряемых для адаптивно-селективной сборки конструктивных параметров представлен в работе [8, рис. 1].

В результате виртуальной сборки для каждого комплекта элементов МО подбирается коррекционное дистанционное кольцо из набора 2—7, обеспечивающее отсутствие сферической аберрации, и кольцо из набора 9—14 — для обеспечения его высоты (см. рис. 1).

Во избежание возникновения комы для каждого компонента при виртуальной сборке определяется его разворот (вокруг внутренней базовой оси цилиндра 15) относительно других компонентов, обуславливающий компенсацию влияния децентрировок оптических поверхностей. Успешное решение этой задачи возможно только в случае, когда значения децентрировок оптических поверхностей компонентов невелики. Так как при автоматизированной сборке нежелательна дополнительная обработка оправ (резанием) на линии, то линзовые компоненты должны поступать на сборку уже собранными и отцентрированными (например, результативной проточкой оправ компонентов на станке JDM 200 фирмы “OptoTech”, Германия [9]), либо линзы при вклейке в оправы (быстроотвердевающим клеем, например марки LOXEAL 30-20, под действием ультрафиолетового излучения) на линии должны быть отцентрированы на специальных автоматизированных станциях (например, OptiCentric фирмы TRIOPTICS, Германия [10]). После вклейки оптических компонентов в оправы следует производить их контроль для выявления возможных деформаций рабочих поверхностей, которые могут привести к астигматизму изображения, формируемого собираемым МО, и осуществлять отбраковку дефектных компонентов.

На основе результатов виртуальной сборки производится реальная сборка МО, осуществляется контроль качества создаваемого изображения и показателей качества МО, а также, при необходимости, выполняется юстировка тех компонентов, допустимые значения показателей качества которых не удалось достигнуть.

**Контроль и обеспечение целевых показателей качества микрообъектива.** Контроль качества изображения на линии осуществляется по дифракционному изображению точки, создаваемому микрообъективом на матрице видеокамеры. Такой контроль весьма информативен, так как по дифракционной картине можно не только количественно оценить качество изображения, но и определить вид аберраций и погрешности их вызывающие. На рис. 3 представлены типичные дифракционные изображения точки, создаваемые МО: *a* — идеальное изображение (в кружке Эри сосредоточено 80 % энергии и более); *б* — наличие сферической аберрации; *в* — наличие комы; *г* — наличие астигматизма. Функциональная схема станции для контроля качества изображения приведена на рис. 4, где 1 — узел с точечной диафрагмой (в зависимости от числовой апертуры контролируемого МО диаметр отверстия должен быть в пределах от 0,2 до 3 мкм); 2 — контролируемый МО; 3 — видеокамера (с проекционным МО или безобъективная); 4 — монитор компьютера.

На рис. 5, *a* приведено фотоизображение опытного макета станции, а на рис. 5, *б* — трехмерное компьютерное представление дифракционного изображения точки, полученное на макете.

В настоящее время разработана технология изготовления точечных диафрагм с необходимыми размерами отверстий с диаметром от 0,2—0,3 мкм (например, фирмой “Masken Lithographie und Consulting”, Германия).

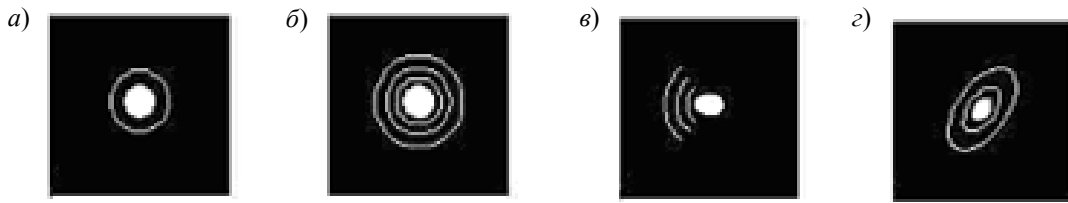


Рис. 3

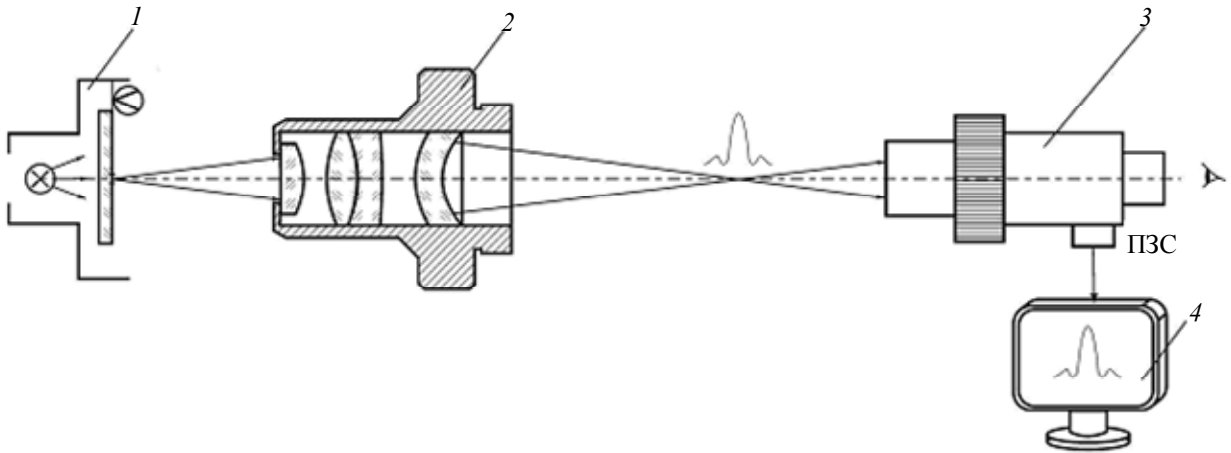


Рис. 4

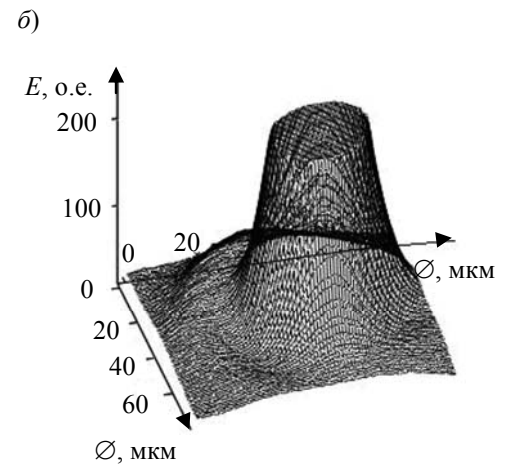
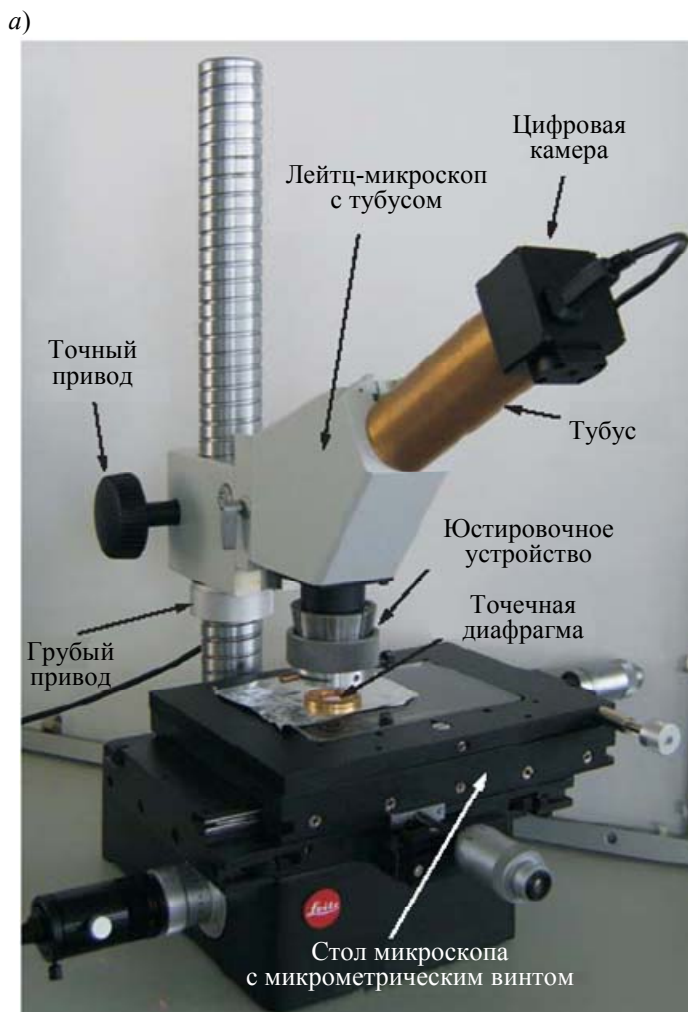


Рис. 5

Контроль высоты МО, а также контроль и обеспечение соосности его оптической и механической осей (эту операцию называют центровкой, при которой добиваются расположения эквивалентной узловой точки МО на его базовой механической оси) производят на станции, функциональная схема которой представлена на рис. 6: здесь контролируемый МО 3 строит изображение марки 1 на ПЗС-приемнике, передающем изображение на монитор компьютера (для объективов с тубусом бесконечность в ход лучей включается тубусная линза 4 с  $f' = 160$  мм). По величинам смещения (измеряется по матрице ПЗС) и расфокусировки (измеряется по индикатору положения марки) изображения (по отношению к изображению, созданному эталонным МО, по которому была настроена станция) судят об этих целевых показателях качества МО. Если не обеспечена высота МО, то по значению расфокусировки, измеренному автоматизированным индикатором (например, ЛИР-14 фирмы SKB IS, Россия), подбирается необходимая толщина коррекционного кольца из набора 9—14 (см. рис. 1). Если центровка МО не обеспечена, то разворотом, относительно корпуса 16 (см. рис. 1), цилиндра 2 (деталь 15 на рис. 1), имеющего некоторый эксцентриситет внутреннего отверстия относительно своего наружного диаметра, добиваются необходимой центровки МО.

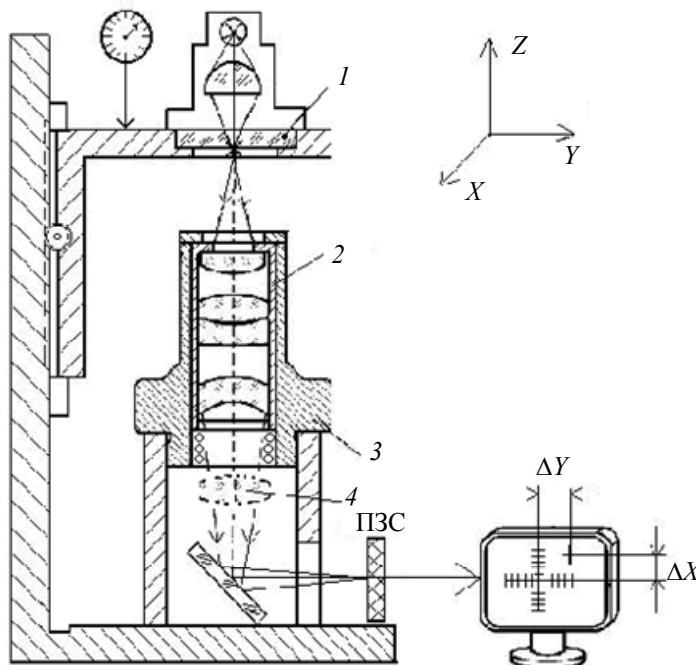


Рис. 6

**Структура линии автоматизированной сборки.** Структурная схема процесса автоматизированной сборки микроскопов с необходимыми станциями, соединенными транспортной линией, приведена на рис. 7.

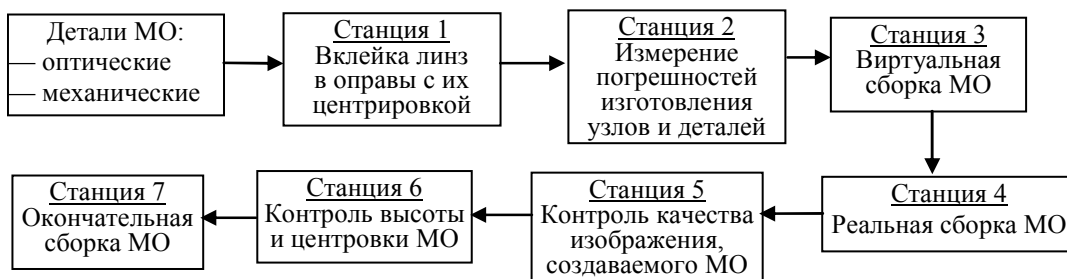


Рис. 7

**Заключение.** Представленный проект линии автоматизированной сборки МО позволяет обеспечить ряд целевых показателей качества микроскопов путем адаптивной селекции их компонентов и адаптивного монтажа, исключить или существенно уменьшить число

юстировочных операций, а также отказаться от дополнительной обработки деталей и узлов МО в процессе их сборки. В настоящее время линия автоматизированной сборки МО монтируется на фирме ОАО „ЛОМО“ (Санкт-Петербург).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Latyev S. M., Jablotschnikov E. I., Padun B. S. et al.* Laboratory for automated assembly of microscope lenses // 53 Intern. Wissenschaftliches Kolloquium. Techn. Univ. Ilmenau, 8—12 Sept. 2008.
2. *Latyev S. M., Jablotschnikov E. I., Padun B. S. et al.* Laboratorium zur automatisierten Montage von Mikroskopobjektive // Intern. Workshop “Flexible Montage”. Techn. Univ. Ilmenau, 12 Sept. 2008.
3. *Латыев С. М., Смирнов А. П., Воронин А. А. и др.* Концепция линии автоматизированной сборки микрообъективов на основе адаптивной селекции их компонентов // Оптич. журн. 2009. № 7.
4. *Латыев С. М., Табачков А. Г., Фролов Д. Н., Резников А. С.* Унификация оптических и механических конструкций линзовых микрообъективов // Наст. выпуск. С. 14—21.
5. *Табачков А. Г., Латыев С. М., Фролов Д. Н.* Унификация конструкций линзовых микрообъективов // Оптич. журн. 2011. № 1.
6. *Латыев С. М.* Конструирование точных (оптических) приборов. СПб: Политехника, 2007.
7. *Латыев С. М., Смирнов А. П., Фролов Д. Н. и др.* Обеспечение целевых показателей качества при автоматизации сборки микрообъективов // Оптич. журн. 2010. № 1.
8. *Смирнов А. П., Латыев С. М.* Математическая модель автоматизированной сборки микрообъективов // Наст. выпуск. С. 22—28.
9. Электронный ресурс: <<http://www.optotech.de>>.
10. Automated Centering and Bonding Machine [Электронный ресурс]: <<http://www.trioptics.com>>.

*Сведения об авторах*

- Святослав Михайлович Латыев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; зав. кафедрой; E-mail: [smlatyev@yandex.ru](mailto:smlatyev@yandex.ru)
- Александр Павлович Смирнов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: [apsmirnov@bk.ru](mailto:apsmirnov@bk.ru)
- Алексей Геннадьевич Табачков** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: [aletlab@yandex.ru](mailto:aletlab@yandex.ru)
- Дмитрий Николаевич Фролов** — канд. техн. наук; фирма „Фокус“, Санкт-Петербург; E-mail: [fronda@list.ru](mailto:fronda@list.ru)
- Родион Владимирович Шухат** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов

Поступила в редакцию  
26.04.11 г.

С. М. ЛАТЫЕВ, А. Г. ТАБАЧКОВ, Д. Н. ФРОЛОВ, А. С. РЕЗНИКОВ

## УНИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ЛИНЗОВЫХ МИКРООБЪЕКТИВОВ

Рассматриваются принципы унификации микрообъективов, позволившие создать рациональную базовую конструкцию и типовой ряд наиболее востребованных линзовых микрообъективов, а также повысить эффективность их изготовления, сборки и контроля.

*Ключевые слова:* микрообъектив, унификация, конструирование.

**Введение.** В настоящее время при разработке новых конструкций микрообъективов (МО) одним из основных факторов является повышение информативности оптических систем. Это достигается благодаря повышению качества создаваемого изображения путем расширения и улучшения основных оптических характеристик систем. Одновременно ведутся исследования по разработке рациональной конструкции МО и совершенствуется технология их изготовления, сборки и контроля.

Нет сомнения, что проектирование и конструирование МО должно основываться на системности и преемственности конструкций, широком использовании базовых элементов, параметрических рядов и агрегатирования (метод „группового проектирования“), т.е. базироваться на принципах унификации конструктивных решений как оптических, так и „механических“ систем МО [1, 2]. Это позволяет не только разработать более рациональную типовую конструкцию, но и эффективно использовать метод групповой технологии производства [3], а также облегчает создание автоматизированных линий сборки МО.

В настоящей статье рассмотрены аспекты унификации оптических и „механических“ частей конструкций линзовых МО.

**Задачи унификации основных конструктивных параметров микрообъективов.** Структура и конфигурация большинства МО сложилась на основе более чем двухсотлетней истории их существования и совершенствования. При расчете оптических схем МО используются базовые оптические элементы, обладающие необходимыми свойствами для обеспечения оптимальных показателей качества изображения. Вместе с тем в течение долгого времени „механическая“ часть конструкции каждого МО разрабатывалась отдельно и фактически создавалась заново. При этом недостаточно использовались известные решения, не проводилась активная унификация отдельных деталей и узлов, не разрабатывались базовые конструкции тех или иных видов МО, на основе которых можно было бы создать унифицированные их ряды.

Отсутствие унификации не только увеличивает сроки и затраты на проектирование, но и приводит к расширению номенклатуры деталей, оснастки, мерительного инструмента, обуславливает необходимость переналадки технологического оборудования и затрудняет автоматизацию производственного процесса изготовления и особенно сборки МО.

Несмотря на то, что в России достаточно давно ведутся работы по унификации оптических и „механических“ характеристик МО [1, 4—6], до настоящего времени производятся объективы, соответствующие разным стандартам и нормам.

Анализ ряда типовых конструкций как отечественных, так и зарубежных микрообъективов выявил следующие особенности:

— значения высот МО могут изменяться в широких пределах (от 10 до 90 мм), что создает проблемы при работе на револьверном устройстве микроскопа;

- при расчетах оптических систем МО используются разные виды абберационной коррекции, что вынуждает применять разные коррекционные окуляры;
- наличие различных конструктивных параметров присоединительной резьбы не позволяет применять МО на одном револьверном устройстве;
- значения линейных увеличений существующих МО иногда не отвечают рекомендованному стандартам параметрическому ряду;
- конструкции иммерсионных и безиммерсионных (сухих) МО существенно различаются;
- существует множество значений тубусов МО;
- конструктивные параметры „механических“ деталей и узлов МО не унифицированы по видам, формам и размерам;
- конструкции МО недостаточно продуманы в отношении их автоматизированной сборки и юстировки.

Таким образом, не вызывает сомнений актуальность проведения работ по стандартизации и унификации конструкций МО, которые должны обеспечивать: установление их типов и размеров на основе параметрических рядов; взаимозаменяемость групп узлов и деталей; ограничение конструктивных вариантов целесообразным минимумом; снижение удельного расхода материалов и себестоимости продукции; возможность автоматизации их сборки и юстировки.

При создании базовой конструкции линзового микрообъектива авторами было принято следующее решение по унификации ее *основных* параметров, характеристик и свойств:

- МО имеет бесконечную длину тубуса и независимую абберационную коррекцию;
- высота МО должна быть равна 45 мм в соответствии со стандартом DIN или 33 мм — по стандарту RMS;
- значения собственных фокусных расстояний МО рассчитываются исходя из условия использования в микроскопе дополнительной тубусной линзы (системы) с фокусным расстоянием  $f'_{т.л.} = 160$  мм;
- линейные увеличения МО соответствуют ряду, изменяющемуся по геометрической прогрессии со знаменателем 1,6;
- присоединительная резьба МО к револьверному устройству микроскопа имеет значение 0,8”;
- толщина покровного стекла составляет 0,17 мм;
- конструктивное решение „механической“ части сухих и иммерсионных МО, по возможности, должно быть одинаковым;
- унифицированная конструкция МО в целом должна обладать возможностью адаптации к различным условиям работы микроскопа.

**Унификация оптических конструкций.** При синтезе оптических систем МО осуществляется разработка их принципиальных оптических схем, подбор необходимых оптических материалов и конструктивных параметров компонентов, определяются виды оптических покрытий и т.п. Унификация конструктивных решений при этом может быть основана на использовании и композиции некоторых базовых оптических компонентов с заранее известными свойствами и абберациями для определения оптимальных характеристик и показателей качества изображения, формируемого проектируемым МО. К таким компонентам можно отнести одиночные мениски, положительные одиночные линзы и склейки, используемые в „средней“ части оптической схемы.

В качестве примера рассмотрим модель унифицированной оптической конструкции (рис. 1) стигмахромата (отечественный шифр ОСХ) [7]. Эта конструкция используется как базовая в ряде изготавливаемых в настоящее время МО, имеющих различные линейные увеличения и апертуры. Конструкция содержит две части, первая из которых включает



$n$  фронтальных одиночных линз 1 и склейку 2 (из двух линз), а вторая часть состоит из одиночной положительной линзы 3 и мениска 4; на варьируемом расстоянии  $L$  от мениска расположена материальная диафрагма для оптимизации параметров астигматизма (в предельном случае ее роль может выполнять механический торец объектива). Благодаря использованию данного решения были получены варианты ахроматических МО с различным количеством фронтальных компонентов ( $n=0\dots3$ ), обеспечивающих разные увеличения и числовые апертуры  $A_n$ : 0,1 (при  $n=0$ ); 0,25 и 0,4 (при  $n=1$ ); 0,6—0,65 (при  $n=2$ ); 1,25—1,30 (при  $n=3$ ). Количество необходимых фронтальных линз при этом может быть определено из следующего соотношения:  $n = (f'_2 / f'_{об}) - 1$ , где  $f'_2$  и  $f'_{об}$  — приведенные фокусные расстояния второй части и МО в целом.

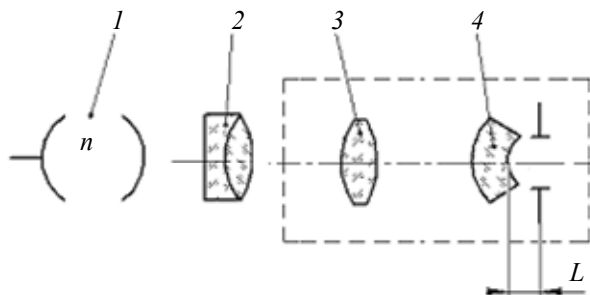


Рис. 1

**Унификация механических конструкций.** Базовой унифицированной конструкцией (основанием ряда) считается та, которая обладает наибольшим числом общих признаков, присущих всем видам разрабатываемого ряда линзовых МО. Остальные конструкции МО являются модификациями базовой и незначительно отличаются от нее количеством и некоторыми конструктивными параметрами „механических“ деталей (оптические элементы в них, естественно, разные). На основе анализа многообразия существующих конструкций МО, с учетом вышеперечисленных задач унификации, авторами была разработана структура и конфигурация (модель) базовой механической конструкции МО (рис. 2).

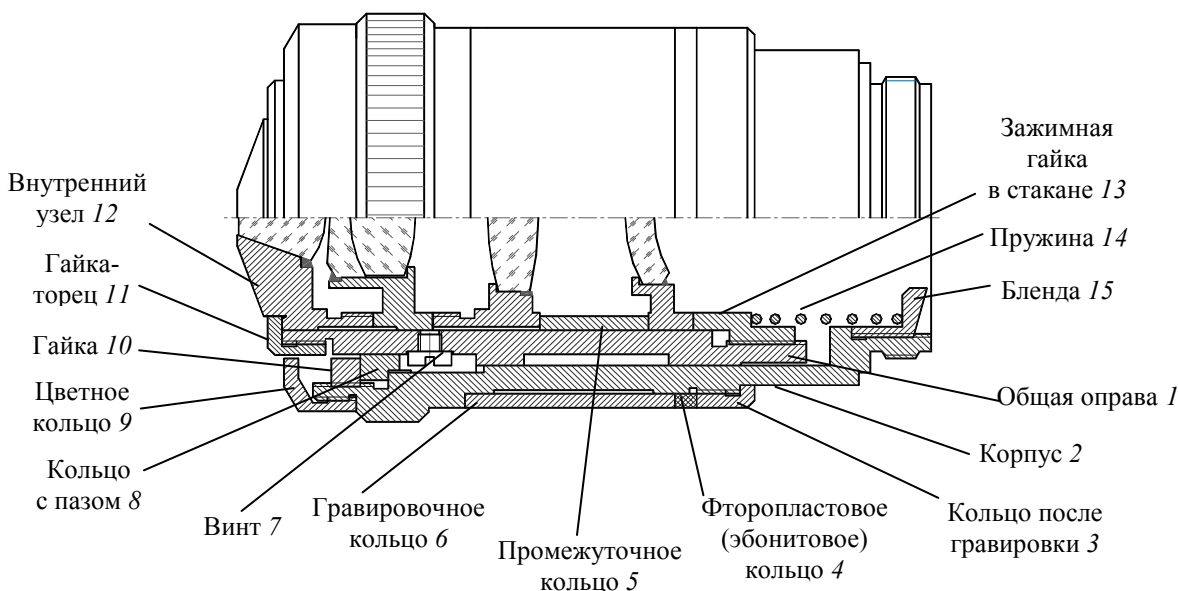


Рис. 2

Отличительной особенностью этой конструкции является то, что все оправы оптических элементов (внутренние узлы) имеют одинаковый наружный диаметр и устанавливаются в общую оправу (стакан) открытого типа, которая может перемещаться и разворачиваться в корпусе МО. Базовая конструкция содержит большое количество наружных деталей, которые



могут быть одинаковыми в различных модификациях. Модифицированные ряды МО в основном отличаются диаметрами и продольными размерами узлов и деталей, для которых установлено ограниченное число их типоразмеров.

После изготовления и испытаний опытных образцов МО унифицированной конструкции были уточнены оптимальные продольные размеры и диаметры МО, которые были установлены одинаковыми для соответствующих групп.

На рис. 3, а представлены варианты унифицированных модификаций базовой конструкции МО, имеющих различные диаметры и увеличения, но одинаковые продольные размеры, а на рис. 3, б, в — варианты внутрирядовой модификации (различия имеются только по длине корпуса и стакана).

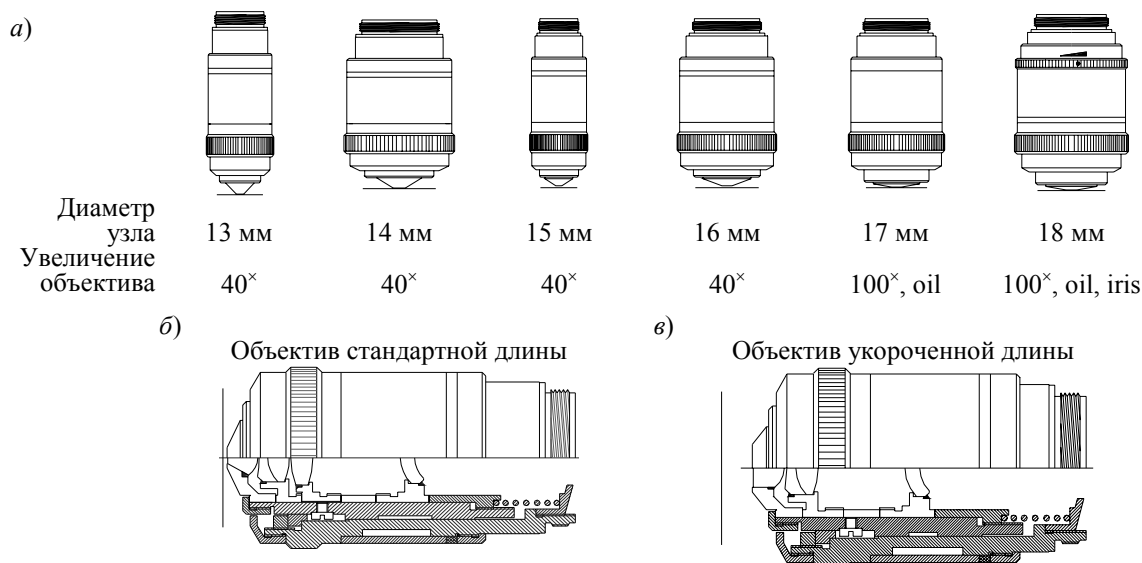


Рис. 3

Использование разработанной унифицированной конструкции позволило уменьшить номенклатуру деталей и создать оптимальную линейку из шести модифицированных рядов, каждый из которых содержит большое количество конкретных унифицированных элементов.

В табл. 1 представлены технико-экономические показатели не унифицированных (прежних) и унифицированных микробъективов, разработанных на основе базовой конструкции.

Таблица 1

Показатель	Прежняя конструкция	Новая конструкция	
	Среднее значение для каждого МО (650 шт)	Модифицированные ряды МО (6 шт)	Внутрирядная унификация МО (370 шт)
Количество оригинальных деталей, %	100	90	10—1
Коэффициент применяемости, %:			
	изделия	1	12
технической оснастки	1	12	90—100
Временные затраты, %:			
	на разработку конструкции	100	120
на разработку технической оснастки	100	80	20—5

Уровень унификации конструкций МО и оснастки определяется коэффициентом применяемости  $K = \frac{N_{\Sigma} - N}{N_{\Sigma}} \cdot 100\%$ , где  $N$  — количество типоразмеров оригинальных составных

деталей,  $N_{\Sigma}$  — общее количество типоразмеров составных деталей, включая оригинальные, унифицированные, нормализованные, стандартные и покупные.

Унифицированные МО могут быть использованы в микроскопах при различных вариантах работы, поэтому необходимо было также предусмотреть возможность их адаптации к различным условиям. На рис. 4, *a—г* представлены варианты конструкций МО, адаптированных к разным толщинам покровных стекол ( $t_{п.с} = 0; 0,17; 0,5; 1,5; 2$  мм) и значениям освещенности, а также к фазово-контрастному эффекту.

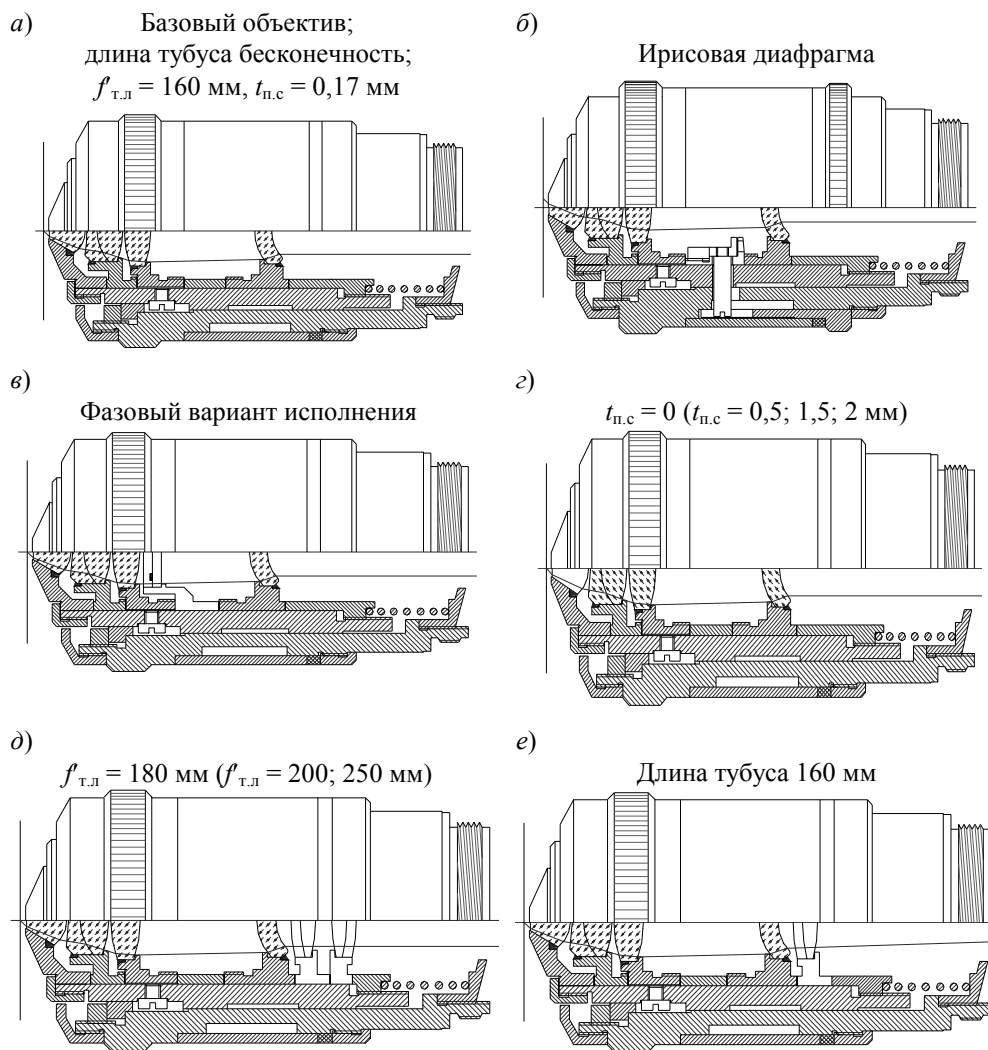


Рис. 4

Другим вариантом адаптации является использование унифицированной конструкции МО в микроскопах с различной длиной тубуса (рис. 4, *д, е*). Например, базовый объектив, рассчитанный на бесконечную длину тубуса (при наличии дополнительной системы с  $f' = 160$  мм), требуется адаптировать к использованию в микроскопе с конечной длиной тубуса 160 мм. В этом случае конструкция МО может быть дополнена узлом с собственным фокусным расстоянием  $f' = 160$  мм. Если требуется тот же объектив адаптировать к микроскопу, в котором используется дополнительная система с фокусным расстоянием 180, 200 или 250 мм, конструкция объектива может быть оснащена другими узлами.

При разработке объективов использовался метод группового проектирования, при котором заранее предусматривались все возможные вариации исполнения унифицированной конструкции МО с заимствованием элементов как внутри группы (линейки) объективов, на которые они были разбиты, так и межгрупповой унификации. В табл. 2 представлены резуль-

таты унификации „механической“ части конструкции МО, имеющих различные оптические схемы и характеристики.

Таблица 2

Шифр объектива	Деталь (в соответствии с обозначениями, принятыми на рис. 2)															Палец	Диафрагма в сборе
	1	2	3	4	4	5	6	7	8	9	10	11	13	14	15		
ОСХ-40-0 (0.17) 40/0.65 (б/и)	1 (Ø13)	1	1	1	—	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	—	—
ШП-ОПА-100Б-0 100/0.95	2 (Ø14)	2	2	2	—	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1	—	—
ОСХ-100-0-1 100/1.25 ми (б/и)	3 (Ø15)	3	2	—	3	3	3	1	3	3	3	3	3	1	1	—	—
ОФ-40Л-0 40/0.85	4 (Ø16)	4	3	4	—	4	4	1	4	4	4	4	4	4	4	—	—
ОФ-20Л-0 20/0.70	4	4	4	4	—	—	4	1	4	4*	4	4	4*		7	—	—
ОФ-100-0-1 100/1.30 ми (б/и)	3	3	3	—	3	3	3	1	3	3	3	3	3	1	1	—	—
ОФ-100Л-0-1-И 100/1.30 ми (ир)	3*	3*	3	—	3	—	3	1	3	3	3	3	3	1	1	9	9
ОФ-100Л-0-2 100/1.20 ви (б/и)	3	3	3	10	—	3	3	1	3	3	3	3	3	1	1	—	—
ОСХ-10-0 10/0.25 (б/и)	4**	4**	2	2	—	—	2	—	—	11	11	4	1	—	7	—	—
ОСХ-20Б-0 (d=0) 20/0.45 (б/и)	4	4	4	4	—	4**	4	1	4	4*	4	4	4	1	14	—	—
ОСХ-20Б-0-И (d=0) 20/0.45 (ирис)	4*	4*	4	4 13	—	—	13	1	4	4*	4	4	4	1	13	3	17
ОСХ-20-0 (0.17) 20/0.45 (б/и)	4	4	4	4	—	4**	4	1	4	4*	4	4	4	1	14	—	—
ОСХ-20-0-И (0.17) 20/0.45 (ирис)	4*	4*	4	4 15	—	—	15	1	4	4*	4	4	4	1	12	3	15
ОСХ-40ЛБ-0-2 40/0.75 ви	1	1	1	1	16	1	1	1	1	1	1	1	1	—	1	—	—
ОСХ-40Б-0 (d=0) 40/0.65 (б/и)	1	1	1	1	—	1**	1	1	1	1	1	1	1	1	1	—	—
ОСХ-40-0 (0.5) 40/0.65 (б/и)	1	1	1	1	—	1**	1	1	1	1	1	1	1	1	1	—	—
ОСХ-100-0-1И 100/1.25 ми (ир)	3*	3*	3	—	3	—	3	1	3	3	3	3	3	1	3	11**	9

Принятые обозначения:

- 4 — деталь применяется в первый раз;
- 4 — деталь заимствуется;
- 4\* — деталь заимствуется с незначительной доработкой;
- 4\*\* — детали, подобные по диаметрам, но отличные по габариту;
- 4 13 — применяются две детали (новая деталь и деталь из ряда 1—4)

Для сокращения размеров таблицы приведены данные относительно четырех базовых объективов (базовая линейка состоит из шести МО: 1 — Ø13, 2 — Ø14, 3 — Ø15, 4 — Ø16, 5 — Ø17, 6 — Ø18).

**Технологические аспекты создания унифицированной конструкции микробъективов.** Благодаря базовому методу унификации конструкций МО удалось создать достаточно большое количество различных их вариантов при ограниченном числе типоразмеров деталей (т.е. унифицированных по конфигурации, размерам и форме). Это позволило существенно повысить технологические показатели МО благодаря не только уменьшению количества оригинальных деталей, но и использованию групповой технологии производства, уменьшению количества оснастки и мерительного инструмента. Для повышения производительности сборки МО в базовой конструкции была предусмотрена возможность автоматизации некоторых процессов сборки и юстировки. Рассмотрим эти возможности на примере фрагмента сборочного чертежа базовой конструкции МО (рис. 5).

Как видно из чертежа, крепление оптических компонентов (линз и склеек) в оправках (внутренние узлы) унифицированной конструкции осуществляется методом приклеивания. Этот метод имеет ряд преимуществ по сравнению с завальцовкой компонентов в оправы [2] и позволяет повысить производительность сборки особенно в связи с появлением фотополимеризирующихся (под действием УФ-излучения в течение 10—15 с) клеев и автоматизированных станций, осуществляющих вклейку с возможностью центрировки оптических компонентов [8].

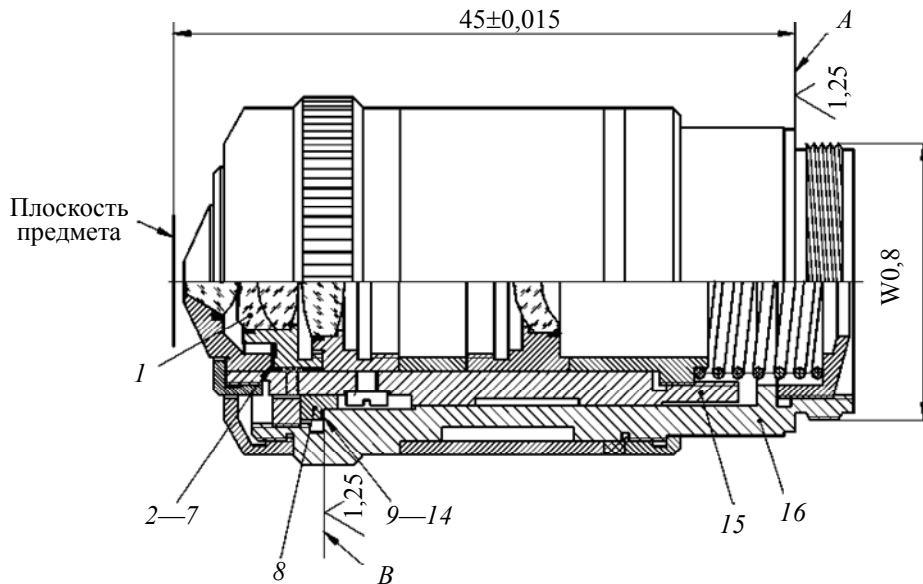


Рис. 5

Сборка внутренних узлов в общую оправу (стакан) 15 может осуществляться как вручную, так и роботом с передней (с „носика“) или задней ее части. Для компенсации влияния децентрировок компонентов на aberrации (кому) при неавтоматизированной сборке предусмотрена возможность радиального сдвига узла 1 через отверстия в стакане 15. При автоматизированной сборке каждый внутренний узел устанавливается роботом с разворотом (вокруг внутренней базовой оси стакана) на определенные углы, значения которых рассчитываются по математическим моделям виртуальной сборки [9].

Для компенсации сферической aberrации МО предусмотрено коррекционное прокладное кольцо (из набора 2—7), толщина которого при автоматизированном процессе рассчитывается заранее на основе виртуальной сборки.

Высота МО при автоматизированной сборке обеспечивается подбором специального дистанционного прокладного кольца (из набора 9—14), толщина которого также рассчитывается заранее. При сборке „ручным“ способом высота МО достигается подрезкой торца В кольца с пазом 8 после замера реальной высоты объектива.

Расположение эквивалентной узловой точки МО на его базовой механической оси (оси резьбы корпуса 16, перпендикулярной опорному торцу А) обеспечивается (при ослабленном креплении кольца с пазом 8) разворотом собранного цилиндра 15 в корпусе 16 благодаря наличию некоторых эксцентриситетов этих деталей. Как исключение, необходимое расположение эквивалентной узловой точки (называемое на практике „центровкой оптической и механической осей“ МО) может быть достигнуто подрезкой торца А на специальном станке [2].

Более подробно с концепцией линии автоматизированной сборки унифицированных МО можно ознакомиться в работе [10].

**Заключение.** Унификация оптических и механических конструкций МО позволяет:

- значительно сократить сроки проектирования МО;
- уменьшить номенклатуру деталей и снизить затраты на их производство;

— вывести на уровень международных стандартов технические характеристики и дизайнские показатели МО;

— создать условия для автоматизации сборки и юстировки МО.

Представляется целесообразным продолжить работы по унификации конструкций эпи-объективов, зеркальных и зеркально-линзовых микрообъективов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Л. Н., Панов В. А. Оптика микроскопов. Расчет и проектирование. Л.: Машиностроение, 1976.
2. Латыев С. М. Конструирование точных (оптических) приборов. СПб: Политехника, 2007.
3. Митрофанов С. П. Групповая технология машиностроительного производства. В 2 т. Л.: Машиностроение, 1983.
4. Скворцов Г. Е. и др. Микроскопы. Л.: Машиностроение, 1969.
5. Панов В. А., Кругер М. Я. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Л.: Машиностроение, 1980.
6. Технические условия на микрообъективы (ТУ 3-3.870-83).
7. Фролов Д. Н. Синтез оптических систем линзовых микрообъективов // Оптич. журн. 2002. № 9.
8. Automated Centering and Bonding Machine [Электронный ресурс]: <<http://www.trioptics.com>>.
9. Смирнов А. П. и др. Обеспечение целевых показателей качества при автоматизации сборки микрообъективов // Оптич. журн. 2010. № 1.
10. Латыев С. М., Смирнов А. П., Табачков А. Г., Фролов Д. Н., Шухат Р. В. Проект линии автоматизированной сборки микрообъективов // Наст. выпуск. С. 7—13.

#### Сведения об авторах

- Святослав Михайлович Латыев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; зав. кафедрой; E-mail: [smlatyev@yandex.ru](mailto:smlatyev@yandex.ru)
- Алексей Геннадьевич Табачков** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: [aletlab@yandex.ru](mailto:aletlab@yandex.ru)
- Дмитрий Николаевич Фролов** — канд. техн. наук; фирма „Фокус“, Санкт-Петербург; E-mail: [fronda@list.ru](mailto:fronda@list.ru)
- Анатолий Сергеевич Резников** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов

Поступила в редакцию  
26.04.11 г.

А. П. СМОРНОВ, С. М. ЛАТЫЕВ

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ МИКРООБЪЕКТИВОВ

Приведен вывод соотношений, положенных в основу алгоритма автоматической сборки микрообъективов с учетом технологических погрешностей их компонентов.

**Ключевые слова:** микрообъектив, сборка, автоматизация, модель.

Алгоритм автоматической сборки микрообъективов базируется на математической модели реальной конструкции, учитывающей технологические погрешности ее компонентов [1, 2]. Критериями качества сборки микрообъектива из реальных компонентов (с погрешностями) являются его суммарные aberrации — сферическая, кома, дисторсия, астигматизм, которые на практике выявляются по дифракционному изображению точки. В предлагаемой в настоящей статье модели оптимизация конструкции осуществляется по критериям минимума сферической aberrации и комы. Для вычисления целевой функции требуется информация о пространственном положении всех оптических поверхностей микрообъектива. Решению этой задачи и посвящена настоящая статья.

Рассмотрим обобщенный компонент микрообъектива, представляющий собой линзу, заключенную в оправу (рис. 1, а), где базовыми поверхностями являются плоскость  $A$  и цилиндр  $E$ , образующие базовую ось  $EA$ . На рис. 1, б, в показаны измеренные параметры и первичные погрешности обобщенного компонента, лежащие в пределах соответствующих допусков.

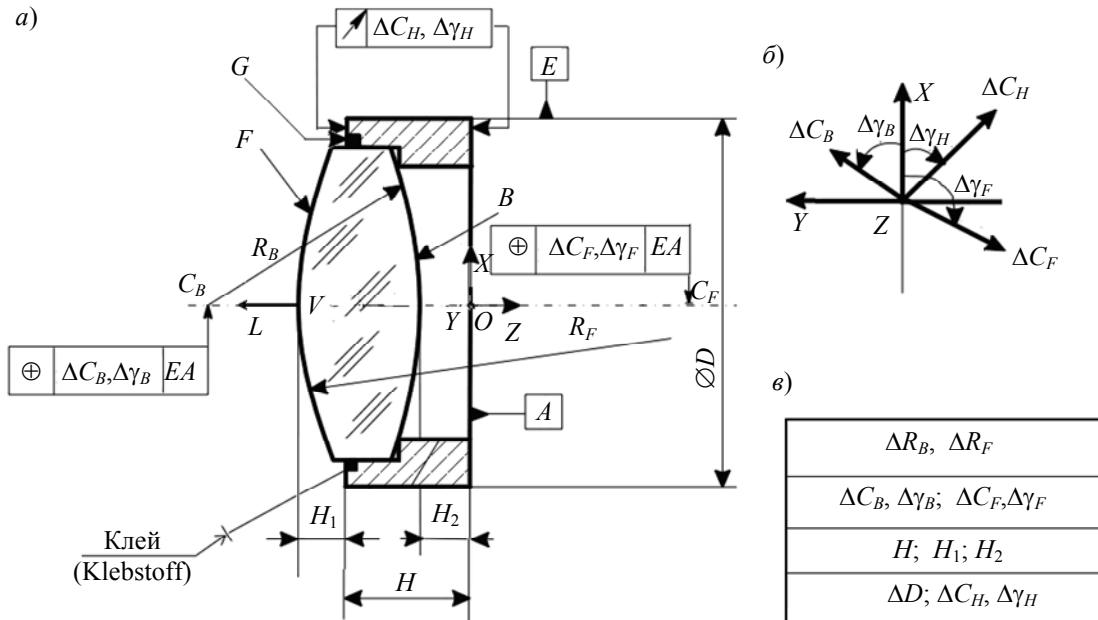


Рис. 1

Оптические поверхности будем задавать координатами вершины  $V$  и ортом  $L$  нормали к поверхности в точке вершины во внешней системе координат ( $OXYZ$ ), ось аппликат которой направлена вдоль оптической оси, ось абсцисс, например, вертикальна, а ось ординат — горизонтальна. Начало координат находится на одной из базовых плоскостей, например, первого компонента по ходу лучей. Координаты вершины и направление нормали зависят от пара-

метров элементов объектива и погрешностей, технологических и конструктивных, связанных с креплением объектива.

Базовая ось  $EA$  используется для центрировки поверхностей линзы при ее вклейке или результативной обработке оправы после вклейки линзы. Относительно поверхности  $A$  задаются допуски на торцевое биение, в результате которого рабочая плоскость  $G$  оправы имеет наклон к вертикальной плоскости  $OXY$ . Торцевое биение (согласно ГОСТ 24642-83) — это разность наибольшего и наименьшего расстояний  $\Delta C_H$  от базовой плоскости, перпендикулярной базовой оси, до рабочей плоскости. Помимо этого параметра, для определенности должны быть известны азимут наклона  $\Delta\gamma_H$  относительно координатной оси  $OX$  (или метка наклона) и абсолютное значение толщины  $H$  оправы в плоскости сечения, отмеченной меткой (рис. 2). В зоне, отмеченной меткой, торцевое биение максимально.

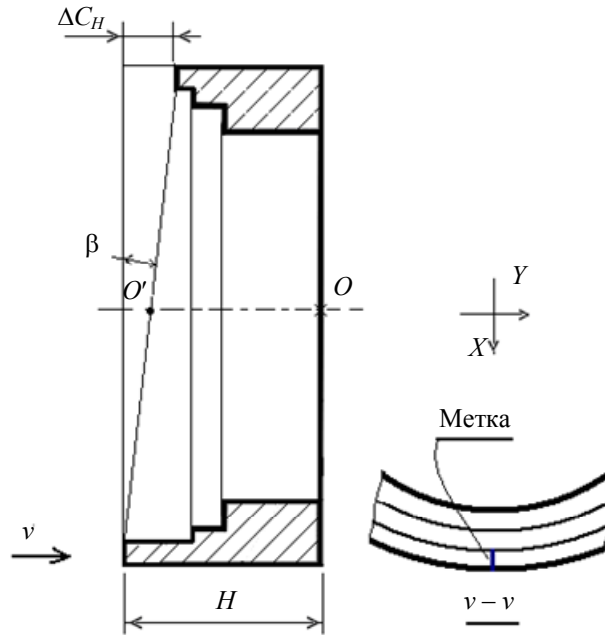


Рис. 2

Измерение толщин  $H$ ,  $H_1$  и  $H_2$  оправы осуществляется по единой линии в одной меридиональной плоскости. Азимутальные углы эксцентриситетов отсчитываются от метки на торце оправы (см. рис. 2). С помощью измеренных величин толщин и параметров эксцентриситетов вершин определяются положения вершин и направления нормалей к оптическим поверхностям. Для удобства изложения отметим 6 этапов, ведущих к решению поставленной задачи.

**1. Определение параметров вершины оптической поверхности в локальной системе координат.** В локальной системе координат, с началом координат в точке  $O$  пересечения оптической оси базовой плоскостью  $A$  (см. рис. 1 и 2), координаты вершин поверхностей любого компонента объектива с учетом децентрировки определяются как

$$\begin{aligned} V_F &= \Delta C_F \cos(\Delta\gamma_F) \cdot \mathbf{i} + \Delta C_F \sin(\Delta\gamma_F) \cdot \mathbf{j} + (H_1 - H) \cdot \mathbf{k}, \\ V_B &= \Delta C_B \cos(\Delta\gamma_B) \cdot \mathbf{i} + \Delta C_B \sin(\Delta\gamma_B) \cdot \mathbf{j} - H_2 \cdot \mathbf{k}. \end{aligned} \tag{1}$$

Нормаль к оптической поверхности в этой же локальной системе координат коллинеарна оси аппликат:  $\mathbf{L} = \mathbf{k}$ .

**2. Вычисление глобальных координат реперной точки.** Локальные координаты реперной точки имеют начало на оптической оси в центре оправы (точка  $O$  на рис. 2); глобальные координаты этой точки зависят от параметров торцевого биения соприкасающихся компонентов. Координаты реперной точки  $Z_{k+1}$ , ее аппликата, как следует из рис. 3, определяются как проекция векторного суммирования:

$$Z_{k+1} = Z_k + c_1 + c_2 + c_3, \tag{2}$$

$$c_1 = \frac{D_{k+1}}{2} \sin \beta_k; \quad c_2 = HN_k; \quad c_3 = \frac{D_{k+1}}{2} \sin \beta_{k+1}; \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta C_H}{D},$$

где  $\beta_k$  и  $\beta_{k+1}$  — углы наклона плоскостей к вертикальной плоскости;  $N_k$  — нормаль к  $k$ -й оптической поверхности.

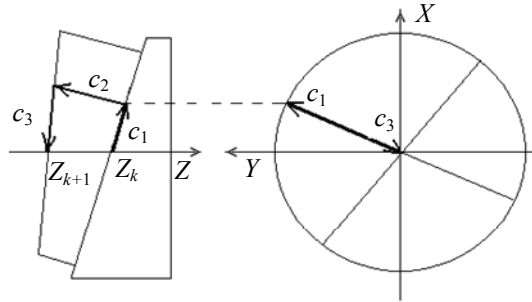


Рис. 3

**3. Определение нормали к плоскости, имеющей торцевое биение.** Рассмотрим результат присоединения базовой плоскости  $A$  компонента к плоскости, имеющей вследствие торцевого биения наклон на угол  $\beta$  и на азимутальный угол  $\Delta\gamma_H$ , отмеченный меткой (см. рис.2). Тогда нормаль к оптической поверхности можно описать вектором  $N$  (рис. 4):

$$N = \begin{pmatrix} \sin \beta \cos(\Delta\gamma_H - \pi) \\ \sin \beta \sin(\Delta\gamma_H - \pi) \\ \cos \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \beta \cos(\Delta\gamma_H) \\ -\sin \beta \sin(\Delta\gamma_H) \\ \cos \beta \end{pmatrix}. \quad (3)$$

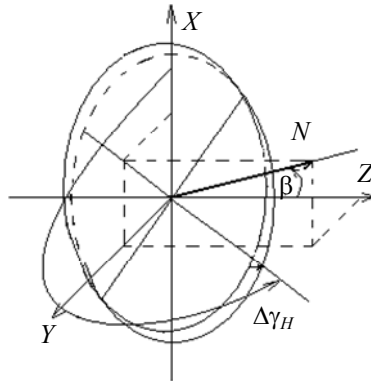


Рис. 4

**4. Определение координат центра оправы относительно реперной точки и направления нормали к оптической поверхности.** Определим координаты точки  $O$  (см. рис. 2) — центра базовой поверхности — в результате ее присоединения к наклонной плоскости, когда компонент сдвигается по опорной плоскости вниз (рис. 5) и точка  $O$  перемещается в точку  $U$ .

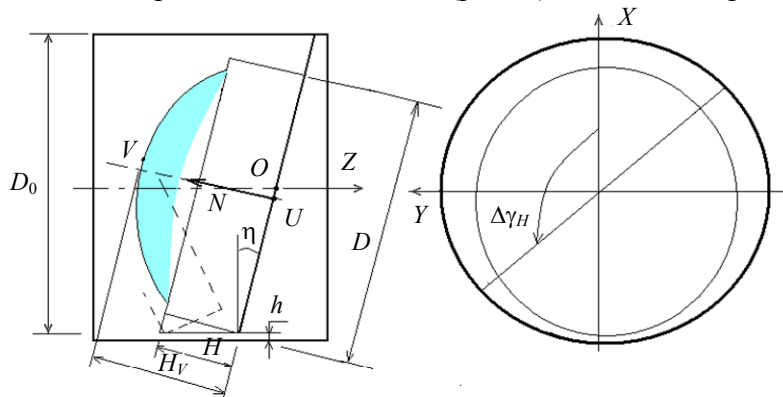


Рис. 5

Положим, что сборка микрообъектива происходит при горизонтально расположенном тубусе (см. рис. 5). Примыкающая деталь находится слева от опорной плоскости. Тогда нор-



маль к опорной плоскости равна вектору  $N_{оп} = (\sin \beta, 0, \cos \beta)$ . В общем случае нормаль к опорной плоскости и оптической поверхности с помощью матрицы поворота относительно оси аппликата ( $M_Z$ ) характеризуется выражением

$$N_{оп} = M_Z(-\Delta\gamma_H) \begin{pmatrix} \sin \beta \\ 0 \\ \cos \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \beta \cos(\Delta\gamma_H) \\ \sin \beta \sin(\Delta\gamma_H) \\ \cos \beta \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Кроме матрицы поворота относительно оси  $OZ$ , необходимо определить матрицу поворота относительно оси  $OY$ , они имеют следующий вид:

$$M_Y(x) = \begin{pmatrix} \cos x & 0 & -\sin x \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin x & 0 & \cos x \end{pmatrix}, \quad M_Z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Углы поворота ( $\eta$ ,  $\theta$ ) нижней направляющей цилиндра оправы относительно осей  $OY$  и  $OX$  согласно выражению (4) определяются как

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{N_X}{N_Z} = \operatorname{tg} \beta \cos(\Delta\gamma_H), \quad \operatorname{tg} \theta = \frac{N_Y}{N_Z} = \operatorname{tg} \beta \sin(\Delta\gamma_H), \quad (6)$$

где  $N_X$ ,  $N_Y$ ,  $N_Z$  — проекции нормали  $N$  на координатные оси.

Вследствие поворота детали вокруг вертикальной оси при перемещении вниз она не достигнет самой нижней точки тубуса. Тогда высота  $h$  (рис. 6) определяется из выражения

$$h = \frac{D_0 - \sqrt{D_0^2 - H^2 \sin^2 \theta}}{2} \approx \frac{H^2 \sin^2 \theta}{4D_0}. \quad (7)$$

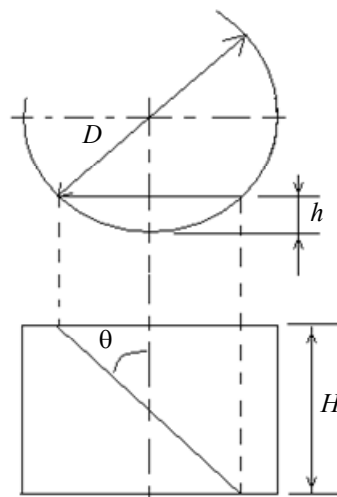


Рис. 6

Прилегание боковых плоскостей смежных деталей произойдет, если боковой зазор имеет достаточную величину. Это условие справедливо при выполнении соотношения

$$H \sin(\Delta\gamma_H) + D \operatorname{tg}(\Delta\gamma_H) \leq D_0. \quad (8)$$

В этом случае в зависимости от того, принадлежит ли азимутальный угол левой или правой полуплоскости, координаты центра  $U$  примыкающей детали, как видно из рис. 5, определяются как

$$U = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} D \cos \eta - D_0 + h \\ 0 \\ D \sin \eta + (D_0 - h) \operatorname{tg} \beta \cos(\Delta\gamma_H) \end{pmatrix}, \quad \frac{\pi}{2} \leq \Delta\gamma_H \leq \frac{3\pi}{2};$$

$$U = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} D \cos \eta - D_0 + h + 2H \sin \eta \\ 0 \\ -D \sin \eta + (D_0 - h) \operatorname{tg} \beta \cos(\Delta\gamma_H) \end{pmatrix}, \quad \Delta\gamma_H \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \cup \left[\frac{3\pi}{2}, 2\pi\right].$$
(9)

Если же условие (8) не выполняется, возникает неопределенность положения примыкающей детали, поэтому алгоритм решения задачи прерывается и исследуется иная комбинация комплектующих деталей.

**5. Определение координат вершины поверхности относительно реперной точки.** Зная положение точки  $U$  на опорной плоскости (см. формулы (9)) и направление нормали к опорной плоскости, координаты вершины оптической поверхности можно определить путем векторного суммирования:

$$V = U + M_Z(\Delta\gamma_H)M_Y(\beta)V_0, \quad (10)$$

где  $V_0 = V_F$  или  $V_B$ , которые определены в уравнениях (1).

**6. Определение направления нормали к опорной плоскости при накоплении технологических погрешностей.** При автоматизированной сборке конструкции микрообъектива положение опорной плоскости определяется наклонами всех задействованных плоскостей. Пусть текущий угол наклона опорной плоскости  $\beta_i$ , азимутальный угол наклона  $\Delta\gamma_{H,i}$ , соответствующие углы примыкающей плоскости:  $\beta_{i+1}, \Delta\gamma_{H,i+1}$ . Как видно из рис. 4, вследствие поворотов, описываемых произведением матриц  $M_Y(\beta_i)M_Z(-\Delta\gamma_{H,i})$ , орт опорной плоскости коллинеарен оси  $OZ$ , поэтому обратное преобразование, примененное к орту нормали к примыкающей плоскости, даст результирующее направление нормали:

$$N'_{i+1} = M_Z(\Delta\gamma_{H,i})M_Y(-\beta_i)N_{i+1}.$$

Таким образом, алгоритм определения координат вершин и направлений нормалей к поверхности компонентов микрообъектива состоит в следующем.

Д а н о :

- 1) положение первой опорной плоскости: параметры торцевого биения  $\Delta C_{H,0}, \Delta\gamma_{H,0}$  и аппликата  $Z_0$  опорной плоскости, измеренная по нулевому азимуту;
- 2) параметры торцевого биения  $\Delta C_{H,i}, \Delta\gamma_{H,i}$  и толщины  $H_i$  оправ компонентов (см. рис.1), измеренные по нулевому азимуту,  $i = 1, 2, \dots, K$ ;
- 3) параметры радиального биения оптических поверхностей:  $\Delta C_{F,i}, \Delta\gamma_{F,i}, \Delta C_{B,i}, \Delta\gamma_{B,i}$ ;
- 4) диаметр тубуса  $D_0$  и диаметры оправ  $D_i$ .

О п е р а ц и и : декартова система координат располагается так, что ось  $OZ$  совпадает с геометрической осью тубуса, ось  $OX$  — вертикальная, ось  $OY$  — горизонтальная. Начало координат выбрано так, что аппликата первой опорной плоскости  $Z_0=0$ .

Р е ш е н и е .

**Шаг 1.** Назначение счетчика компонента:  $i=0$ . Начальные значения параметров базовой плоскости начальной опорной детали:  $Z_0 = 0, \beta_0 = 0, \Delta\gamma_{H,0} = 0$ .

**Шаг 2.** Введение номера следующего компонента:  $i+1$ .

**Шаг 3.** Определение критерия контакта (КК) плоскостей согласно формуле (8):  
 $KK = D_0 - H_i \sin(\Delta\gamma_{H,i-1}) + D_i \operatorname{tg}(\Delta\gamma_{H,i-1})$ .

*Шаг 4.* При условии  $KK < 0$  прерывание вычислений с сообщением о необходимости замены набора компонентов.

*Шаг 5.* Вычисление угла наклона опорной плоскости к вертикальной плоскости:

$$\beta_i = \arctg\left(\frac{\Delta C_{H,i-1}}{D_{i-1}}\right).$$

*Шаг 6.* Определение направления нормали к опорной плоскости с использованием формул (3) и (5):  $N'_i = M_Z(\Delta\gamma_{H,i-1})M_Y(-\beta_{i-1})N_i$ .

*Шаг 7.* Определение аппликаты точки пересечения  $O_i$  опорной плоскости и оси  $OZ$  согласно формуле (2):

$$Z_i = Z_{i-1} + \frac{D_{i-1}}{2}(\sin\beta_{i-1} + \sin\beta_i) + H_{i-1}\cos\beta_{i-1}.$$

*Шаг 8.* Вычисление угла наклона опорной плоскости к горизонтальной плоскости (см. рис. 5) и угла (согласно формуле (6)) между направляющими базового цилиндра и цилиндра оправы (см. рис. 6):  $\operatorname{tg}\eta_i = \operatorname{tg}\beta_i \cos(\Delta\gamma_{H,i-1})$ ,  $\operatorname{tg}\theta_i = \operatorname{tg}\beta_i \sin(\Delta\gamma_{H,i-1})$ .

*Шаг 9.* Вычисление высоты  $h_i = \frac{D_0 - \sqrt{D_0^2 - H_i^2 \sin^2\theta_i}}{2}$ .

*Шаг 10.* Проверка условия  $a = \left\{ \frac{\pi}{2} \leq \Delta\gamma_{H,i-1} \leq \frac{3\pi}{2} \right\}$ .

*Шаг 11.* При выполнении условия  $a$  вычисление координат точки пересечения оптической оси компонента с опорной плоскостью (согласно уравнениям (9)) по формуле

$$U_i = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} D_i \cos\eta_i - D_0 + h_i \\ 0 \\ D_i \sin\eta_i + (D_0 - h_i) \operatorname{tg}\beta_i \cos(\Delta\gamma_{H,i-1}) \end{pmatrix};$$

при невыполнении условия  $a$  — по формуле

$$U_i = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} D_i \cos\eta - D_0 + h_i + 2H_i \sin\eta_i \\ 0 \\ -D_i \sin\eta_i + (D_0 - h_i) \operatorname{tg}\beta_i \cos(\Delta\gamma_{H,i-1}) \end{pmatrix}.$$

*Шаг 12.* Определение координат вершин оптических поверхностей, принадлежащих текущей оправе (1) в локальной системе координат:

$$V_{B,i}^{(\text{лок})} = \begin{pmatrix} \Delta C_{B,i} \cos(\Delta\gamma_{F,i}) \\ \Delta C_{B,i} \sin(\Delta\gamma_{F,i}) \\ H_{2,i} \end{pmatrix}, \quad V_{F,i}^{(\text{лок})} = \begin{pmatrix} \Delta C_{F,i} \cos(\Delta\gamma_{F,i}) \\ \Delta C_{F,i} \sin(\Delta\gamma_{F,i}) \\ H_{1,i} - H_i \end{pmatrix}.$$

*Шаг 13.* Определение координат вершин оптических поверхностей в глобальной системе координат согласно формуле (10):

$$\begin{pmatrix} V_{B,i} \\ V_{F,i} \end{pmatrix} = U_i + M_Z(\Delta\gamma_{H,i-1})M_Y(\beta_i) \begin{pmatrix} V_{B,i}^{(\text{лок})} \\ V_{F,i}^{(\text{лок})} \end{pmatrix}.$$

*Шаг 14.* Если  $i \neq K$ , то переход к шагу 2, иначе — останов алгоритма с выводом параметров оптических поверхностей.

В дальнейшем предложенная модель может быть использована для построения алгоритма автоматизированной сборки микрообъективов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Latyev S. M., Jablotschnikov E. I., Padun D. S. et al.* Laboratory for automated assembly of microscope lenses // 53 Intern. Wissenschaftliches Kolloquium, Techn. Univ. Ilmenau, 8—12 Sept. 2008. P. 247—249.
2. *Бурбаев А. М., Егоров Г. В.* Измерение децентрировок линз в оправках для микрообъективов // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 4. С. 22—26.

*Сведения об авторах*

- Александр Павлович Смирнов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: arsmirnov@bk.ru
- Святослав Михайлович Латыев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; зав. кафедрой; E-mail: smlatyev@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов

Поступила в редакцию  
26.04.11 г.

УДК 535.80

А. П. СМОРНОВ, А. С. РЕЗНИКОВ, Д. А. АБРАМОВ

### АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПЕРЕСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ

Рассматривается программа избирательной весовой оптимизации критериев качества оптического изображения по интегральным абберационным критериям, разработанная с использованием метода случайной генерации исходных параметров оптического прибора, равномерно распределенных по факторному пространству. Приведены примеры расчетов.

**Ключевые слова:** *конструирование, оптическая система, программирование, MathCad.*

Для создания функционального оптического устройства, удовлетворяющего определенным техническим требованиям, необходимо подобрать аналог, проверить его характеристики и произвести при необходимости их перерасчет, используя тот или иной пакет программ. Если такой путь не приносит желаемого результата, то ставится задача по оптическому расчету требуемого устройства.

Эта задача может быть решена с помощью одной из программ расчета оптики. Среди отечественных разработок известны [1]: система автоматизированного расчета оптики (САРО), разработанная в Государственном оптическом институте им. С. И. Вавилова (Санкт-Петербург) А. Б. Дегеном, и система оптических алгоритмов (ОПАЛ), разработанная в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики. Среди зарубежных разработок наиболее востребована в настоящее время программа ZEMAX.

Аналог оптического устройства, как правило, оптимизированный по абберационным критериям, доведен до оптимального определенного уровня, и возможности его улучшения в рамках выбранного пакета программ расчета оптики невелики. С другой стороны, при использовании конкретного функционального устройства не все характеристики аналога в рав-

ной степени важны для конструктора, и возникает вопрос, возможно ли их перераспределение: т.е. можно ли какой-либо параметр улучшить за счет ухудшения другого, несущественного в данных условиях. В этом случае требуется разработать программу избирательной, весовой оптимизации критериев качества оптического изображения, протекающей параллельно анализу аналога. Для этого необходимо пересчитать оптическую схему по некоторому числу ее параметров, что позволит образовать факторное пространство, построить исходные схемы, провести оптимизацию и сравнить с аналогом. В настоящей статье приводится решение этой задачи, реализованное в среде программирования MathCad. Алгоритм решения включает следующие действия.

1. Генерация в рамках конструктивных ограничений большого количества исходных схем, равномерно распределенных по факторному пространству. Число схем и границы параметров задаются пользователем. Некоторые параметры схем могут быть заданы фиксированными значениями: например, параметры плоских или базовых [2] поверхностей, толщины, воздушные промежутки, показатели преломления, коэффициенты асферики.

2. Назначение обобщенного критерия качества изображения, учитывающего реальные aberrации при различных положениях точки предмета по полю зрения, а также поперечную aberrацию, кому, дисторсию, астигматизм, хроматизм.

3. Выбор начальной точки факторного пространства, обуславливающий оптимальное значение обобщенного критерия. При этом используется реальная оптическая схема с небольшим числом лучей в пучке. В качестве математической модели оптической системы используется модель, описанная в работе [3].

4. Составление матрицы планирования полного факторного эксперимента [4] с учетом конструктивных ограничений. Вычисление значения обобщенного критерия, выбор его оптимального значения и повтор процесса до достижения стационарной области.

5. Использование, как один из вариантов алгоритма, дополнительных факторов, например асферизации, не нарушающих конструктивных ограничений, обычно сформулированных в рамках параксиальной оптики. В этом случае алгоритм оптимизации аналогичен изложенному в п. 4.

6. Проверка найденного решения с использованием большого числа лучей и, возможно, незначительная корректировка конструктивных параметров для устранения ошибки дискретизации, поскольку оптимальное решение было найдено с помощью малого числа лучей.

7. Анализ полученного решения, например, с использованием аналога.

8. Анализ влияния зафиксированных ранее (см. п. 1) параметров и выработка окончательного решения.

Приведем примеры, демонстрирующие возможности предложенного алгоритма.

**Конструктивные ограничения.** Все оптические системы могут быть отнесены к трем классам:

А — предмет и его изображение находятся на конечном расстоянии от оптической системы;

Б — либо предмет, либо его изображение находятся на бесконечном расстоянии от оптической системы;

В — и предмет, и изображение находятся на бесконечности (телескопические системы).

Поскольку телескопические системы могут быть разбиты на две системы класса „Б“, то будем рассматривать только класс „А“, а из класса „Б“ — системы типа „объектив“. Класс „А“ будем характеризовать двумя параметрами: расстоянием от плоскости предмета до плоскости изображения ( $L$ ) и линейным увеличением ( $V$ ). Класс „Б“ можно охарактеризовать параметром  $L$ , под которым понимается или заднее фокальное расстояние (параксиальный параметр), или задний фокальный отрезок (реальный параметр).

Для реализации конструктивных ограничений необходима программа расчета параксиальных характеристик оптической системы:  $F(R, T, n)$ , где  $R$  — вектор радиусов кривизны

поверхностей,  $T$  — вектор толщин и воздушных промежутков,  $n$  — вектор показателей преломления. Пусть  $T$  и  $n$  — фиксированные параметры, один из радиусов  $R'$  выбираем свободным параметром, тогда конструктивные ограничения для системы в воздухе будут определяться нулевым уровнем следующих функций:

$$\text{Класс „А“: } G(R') = d' - d + \sum t - L - \frac{(V-1)^2}{V} f' = 0;$$

$$\text{Класс „Б“: } 1) G(R') = f' - L = 0, \quad 2) G(R') = f' + d' - L = 0.$$

Остальные радиусы составляют факторное пространство и задаются по равномерному закону распределения в заданных границах, каждый набор параметров образует точку факторного пространства.

**Обобщенный критерий качества изображения.** Обобщенный критерий строится по пятну рассеяния, полученному с использованием модели реальной оптической системы с помощью трассировки пучка лучей, равномерно распределенных по входному зрачку. Для заданных точек поля (ближней и дальней) рассчитывается среднее квадратическое отклонение (СКО), характеризующее интегральную поперечную абберацию. В пятне рассеяния асимметрия пучка характеризуется сдвигом центра тяжести пятна относительно главного луча, что, в свою очередь, характеризует кому. Сдвиг центра тяжести пятна относительно гауссового изображения характеризует дисторсию, разность СКО абсцисс и ординат дает представление об астигматизме, максимальная разность диаметров хроматических пятен с учетом их положения относительно точки на оси может быть мерой хроматизма положения, а относительно точки на краю поля — мерой хроматизма увеличения. Поскольку все перечисленные критерии имеют одну размерность, то обобщенный критерий может быть сформирован как взвешенная их сумма. Весовые коэффициенты задаются пользователем.

**Оптимизация.** Предварительная оптимизация проводится на стадии стохастического поиска. Уточнение схемы на этапе использования матрицы планирования характеризуется выбором начального шага изменения факторов, например, на первой стадии — 1 мм для радиусов, и на второй стадии — 0,0001 для конических постоянных поверхностей. Далее проводится вычисление критерия по методу градиентного спуска. На этом этапе осуществляется поиск локального экстремума, как и в традиционной методике планирования эксперимента. Смена области поиска экстремума в случае неудовлетворительного результата осуществляется путем повторения алгоритма.

Рассмотрим простой пример автоматизированного пересчета — расчет двухлинзового окуляра. В качестве эталона используем:

- окуляр Рамсдена из двух плосковыпуклых линз, разнесенных относительно друг друга и направленных навстречу друг другу;
- окуляр Фраунгофера, плосковыпуклые линзы в этом случае приближены друг к другу;
- окуляр Гюйгенса, здесь плосковыпуклые линзы обращены плоскостями к глазу наблюдателя [5].

Следует отметить конструктивную особенность окуляра Гюйгенса, которая заключается в том, что в обратном ходе лучей задний фокус является мнимым и расположен между линзами, где может быть помещена сетка. В случае же когда при расчетах фокусное расстояние окуляра Гюйгенса фиксировано, реализуется схема, в которой фокус находится внутри линзы и сетка не может быть использована.

В табл. 1 приведены конструктивные параметры трех типов окуляров, в скобках указаны два варианта рассчитанных параметров: в первом случае (данные в круглых скобках) фиксировался фокальный отрезок, во втором (данные в фигурных скобках) фиксировалось фокусное расстояние. Во всех случаях размер выходного зрачка 5 мм, его положение относительно последней поверхности — 7 мм.

В качестве критерия оптимизации было принято среднее значение СКО поперечной аберрации по полю. Аберрации эталонов и рассчитанных образцов представлены в табл. 2. Как видно из таблицы, сумма СКО для точки на оси (СКО<sub>0</sub>) и на краю поля (СКО<sub>w</sub>) для рассчитанных образцов меньше соответствующей величины для эталона.

Таблица 1

Окуляр Рамсдена (2w=36°)			Окуляр Фраунгофера (2w=40°)			Окуляр Гюйгенса (2w=31°)		
R	t	n <sub>D</sub>	R	t	n <sub>D</sub>	R	t	n <sub>D</sub>
∞	3,5	1,5163	∞	5,0	1,5163	21,4 (-42,395) {-30,202}	3	1,6199
-17,2 (-11,625) {-17,68}	21,7	1,0	-25,815 (-40,757) {-42,43}	0,1	1,0	∞	25,9	1
17,2 (18,403) {16,767}	2,3	1,5163	25,815 (18,913) {17,541}	5,0	1,5163	10,2 (8,234) {13,344}	2,5	1,5163
∞		1,0	∞		1,0	∞		1,0
f' = 24,702; s' <sub>F</sub> = 6,303 (f' = 22,012; s' <sub>F</sub> = 6,303) {f' = 24,702; s' <sub>F</sub> = 5,887}			f' = 25,025; s' <sub>F</sub> = 21,677 (f' = 25,043; s' <sub>F</sub> = 21,677) {f' = 25,025; s' <sub>F</sub> = 20,657}			f' = 24,871; s' <sub>F</sub> = -10,066 (f' = 13,6; s' <sub>F</sub> = -10,066) {f' = 24,871; s' <sub>F</sub> = -1,835}		

Таблица 2

Оптическая система		СКО <sub>0</sub>	СКО <sub>w</sub>	Кома	Дисторсия, %	Хроматизм в центре	Хроматизм на краю
Окуляр Рамсдена	Эталон	0,021	0,033	0,012	-2,6	0,024	0,103
	Расчет	0,016 0,022	0,035 0,031	-0,002 0,011	-7,4 -2,25	0,022 0,024	0,103 0,087
Окуляр Фраунгофера	Эталон	0,013	0,101	0,028	-5,9	0,031	0,009
	Расчет	0,020 0,022	0,063 0,059	0,022 0,018	-4,7 -4,7	0,029 0,029	0,010 0,009
Окуляр Гюйгенса	Эталон	0,088	0,143	-0,043	-3,9	0,044	0,078
	Расчет	0,075 0,039	0,130 0,031	0,016 -0,012	-10,7 -7,1	0,016 0,027	0,044 0,081

Анализ табл. 2 показывает, что для простых двухлинзовых окуляров существуют некоторые возможности оптимизации поперечной аберрации по полю в двух случаях за счет увеличения дисторсии.

Рассмотрим другой пример — окуляр типа Гюйгенса, составленный из склейки (из двух линз) и двояковыпуклой линзы [5]. Угловое поле таких окуляров достигает 45°. Окуляр имеет пять поверхностей. Для уменьшения размерности факторного пространства первая и последняя поверхности задавались плоскими. Конструктивные параметры таких окуляров приведены в табл. 3.

Таблица 3

Окуляр-аналог (2w=70°)			Окуляр № 1 (2w=80°)			Окуляр № 2 (2w=100°)		
R	t	n <sub>D</sub>	R	t	n <sub>D</sub>	R	t	n <sub>D</sub>
66,2	6,0	1,5163	∞	6,0	1,5163	∞	6,0	1,5163
-31,1	18,0	1	-30,943	18,0	1	-50,781	18,0	1
18,1	5,5	1,5399	17,686	5,5	1,5399	17,104	5,5	1,5399
-13,5	1,5	1,6199	141,111	1,5	1,6199	109,565	1,5	1,6199
-95,5			∞			∞		
f' = 25,02; s' <sub>F</sub> = 7,5			f' = 26,066; s' <sub>F</sub> = 7,5			f' = 27,429; s' <sub>F</sub> = 7,5		

Если по конструктивным соображениям дисторсия может быть компенсирована системой обработки изображения, то угловое поле окуляра Гюйгенса может быть раздвинуто до 70°, а для его конструктивных аналогов с плоскими крайними поверхностями — до 80°

и  $100^\circ$ . Интегральные абберрационные характеристики широкоугольных окуляров типа Гюйгенса приведены в табл. 4.

Таблица 4

Окуляр Гюйгенса	СКО <sub>0</sub>	СКО <sub>w</sub>	Кома	Дисторсия, %	Астигматизм	Хроматизм в центре	Хроматизм на краю
Аналог:							
45°	0,014	0,054	0,02	-4,96	0,012	0,005	0,04
70°	0,014	0,422	0,159	-10,13	0,326	0,005	0,048
№ 1:							
45°	0,023	0,044	-0,007	-5,4	0,062	0,029	0,062
80°	0,023	0,121	-0,037	-13,9	0,146	0,029	0,186
№ 2:							
45°	0,026	0,061	-0,011	-5,3	0,036	0,032	0,035
100°	0,026	0,315	-0,074	-26,7	0,053	0,032	0,251

Аналогично проводится пересчет-анализ любой другой оптической системы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Практикум по автоматизации проектирования оптико-механических приборов / Ред. В. В. Малинин. М.: Машиностроение, 1989. 272 с.
2. Русинов М. М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.
3. Смирнов А. П. Модель оптической системы в среде MathCad // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 4. С. 56—62.
4. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
5. Вычислительная оптика. Справочник / Под ред. М. М. Русинова. Л.: Машиностроение, 1984. С. 321—324.

**Сведения об авторах**

- Александр Павлович Смирнов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: apsmirnov@bk.ru
- Анатолий Сергеевич Резников** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов
- Дмитрий Александрович Абрамов** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов

Поступила в редакцию  
26.04.11 г.



---

---

# МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

---

---

УДК 531.7.082: 004.932

А. Н. ИВАНОВ, Ю. А. КАРАКУЛЕВ, В. М. МИХАЙЛОВ

## АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА ПО ЕГО МУАР-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЕ

Рассмотрен метод обработки муаровых полос, основанный на использовании параметрического уравнения, связывающего изменение формы муаровых полос с геометрической формой контролируемого объекта. Предложена методика предварительной обработки изображения для подавления шумов.

*Ключевые слова:* муаровая картина, обработка изображений.

**Введение.** Современные методы контроля геометрических параметров объектов должны обладать высокой точностью, быстродействием и возможностью регистрации контролируемых параметров в режиме реального времени. Во многом эти характеристики зависят от выбора метода регистрации получаемого изображения.

Для формирования изображения в современных приборах широко используются ПЗС-приемники, преобразующие изображение в цифровой сигнал, который необходимо расшифровать. Процесс расшифровки включает:

- определение зависимости между изменением контролируемого параметра объекта и изменением регистрируемого параметра изображения;
- предварительную обработку изображения в целях устранения искажений;
- регистрацию изменения выбранного параметра полученного изображения.

**Модель обработки муар-интерференционной картины.** Для измерения, например, диаметра металлических цилиндров в работе [1] предложено использовать метод, основанный на анализе муар-интерференционной картины на щели между эталонной отражающей поверхностью и образующей цилиндра. Пример такой картины, полученной на цилиндре диаметром 13 мм, приведен на рис. 1. Распределение амплитуды на щели описывается выражением

$$U(\omega_x, y') \approx A \operatorname{sinc}(k \omega_x a(y)/2) \cos((k \omega_x a(y) + k \Delta a(y) \theta)/2 - k \omega_x^2 D \theta/4), \quad (1)$$

где  $\omega_x = x'/z$  — пространственная частота;  $a(y) = a_0 + \Delta a(y)$  — функция, описывающая изменение ширины щели ( $a$ ) между зеркалом и краем объекта;  $k$  — волновое число;  $D$  — диаметр цилиндра;  $\theta$  — угол падения волны на щель;  $A = a(y)/\sqrt{z\lambda}$ ,  $y = y'$ .

Рассматривая функции  $\operatorname{sinc}(\cdot)$  и  $\cos(\cdot)$  выражения (1) как пространственные амплитудно-частотные решетки, можно получить параметрическое уравнение муаровых полос:

$$p = (2 \Delta a(y) \theta - \omega_x^2 D \theta - \lambda) / 2 \lambda, \quad (2)$$

где  $p$  — порядок полосы.

При наклоне цилиндра относительно зеркала ширина щели будет меняться по линейному закону  $\Delta a = \alpha y$ , где  $\alpha$  — угол наклона.

Раскрывая уравнение (2), получаем

$$y' = ((x')^2 D \theta / z^2 + \lambda (2p + 1)) / 2 \alpha \theta. \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что измерив координаты  $x'$  и  $y'$  центра полосы, можно определить диаметр цилиндра. К сожалению, вычислить координаты полос непосредственным измерением невозможно. Невозможно определить и порядок регистрируемых полос. Кроме того, сама муаровая картина требует предварительной обработки для удаления из нее фоновых дифракционных полос. Поэтому авторами была разработана методика, позволяющая вычислить диаметр цилиндра относительным методом.

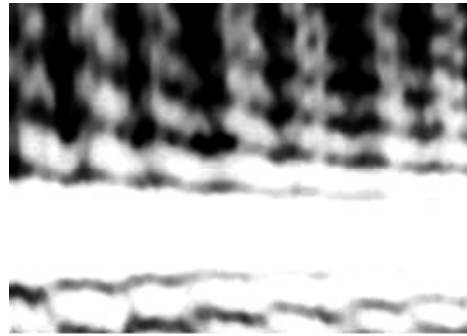


Рис. 1

Сначала из муаровой картины удалялся фон. Для этого выполнялась свертка полученного изображения с одномерной функцией Гаусса, ширина купола которой определялась из выражения  $\sigma_x = 3\nu$ , где  $\nu$  — частота фоновых полос [2].

На следующем этапе из муаровой картины удалялся высокочастотный аддитивный шум. Согласно выражению (2) ширина муаровых полос определяется как

$$S = y(p + 1) - y(p) = \lambda / \alpha \theta. \quad (4)$$

Выражение (4) демонстрирует возможность удаления из фурье-спектра изображения всех гармоник, частоты которых превышают граничную частоту  $\nu_{гр} = 2\pi / S$ . Пример обработанной таким образом муаровой картины приведен на рис. 2.

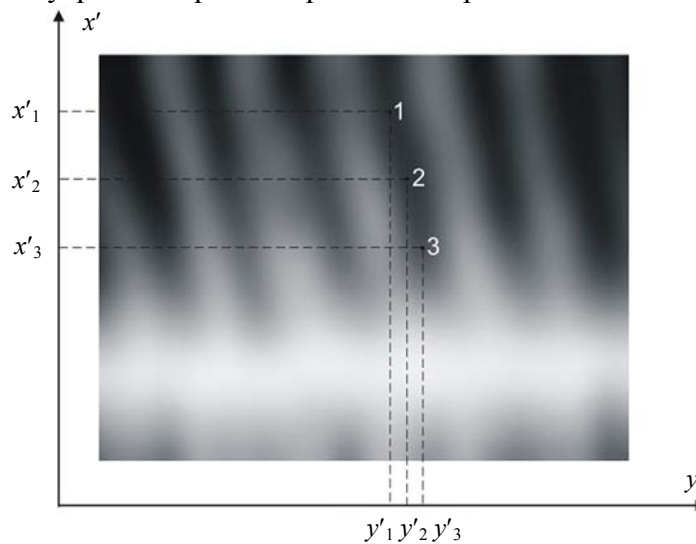


Рис. 2

Затем было получено три сечения зарегистрированной муаровой картины с координатами  $x'_1$ ,  $x'_2$  и  $x'_3$  таким образом, что  $\Delta x' = x'_3 - x'_2 = x'_2 - x'_1$  (см. рис. 2). По этим сечениям определялось смещение точки минимума муаровой полосы порядка  $p$ :  $\Delta y'_2 = y'_3 - y'_2$  и  $\Delta y'_1 = y'_2 - y'_1$ . Положение минимума полосы определялось как центр тяжести заштрихованной фигуры (рис. 3). Для этого сначала приближенно оценивались положение точки минимума ( $m$ ) по наименьшей интенсивности сигнала и положение границ фигуры в пикселах изо-

бражения:  $n_1 \approx m - (S/4t)$  и  $n_2 \approx m + (S/4t)$ , где  $t$  — размер одного пиксела. Затем приближенно оценивалась интенсивность сигнала в максимуме полосы порядка  $p$  —  $I_{\max}$ . Тогда центр тяжести фигуры определялся по формуле

$$m = \frac{\sum_{j=n_1}^{n_2} ((I_{\max} / 2 - I(j)) j)}{\sum_{j=n_1}^{n_2} (I_{\max} / 2 - I(j))}, \quad (5)$$

где  $I(j)$  — интенсивность сигнала в  $j$ -м пикселе сечения.

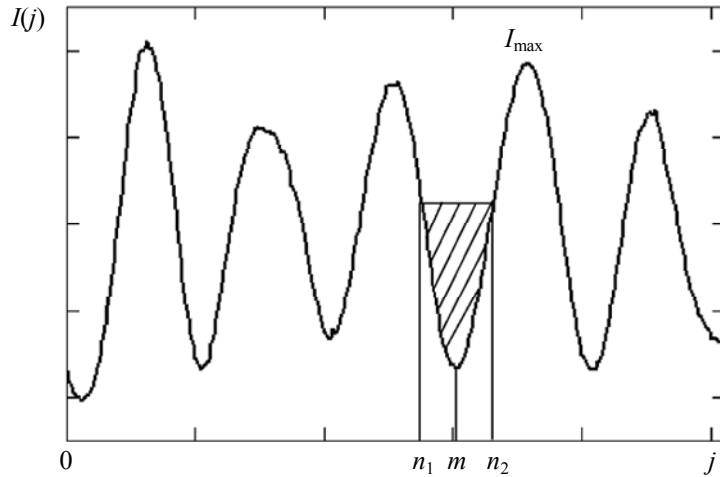


Рис. 3

Так как вычислить абсолютные координаты точек минимумов полос невозможно, определим диаметр объекта через разности этих координат. Для этого составим две системы уравнений, связывающих координаты точек минимумов, воспользовавшись для этого выражением (5):

$$\left. \begin{aligned} y'_3 &= (x'_3)^2 D / 2 z^2 \alpha + \lambda (2 p + 1) / 2 \alpha \theta, \\ y'_2 &= (x'_2)^2 D / 2 z^2 \alpha + \lambda (2 p + 1) / 2 \alpha \theta; \\ y'_2 &= (x'_2)^2 D / 2 z^2 \alpha + \lambda (2 p + 1) / 2 \alpha \theta, \\ y'_1 &= (x'_1)^2 D / 2 z^2 \alpha + \lambda (2 p + 1) / 2 \alpha \theta. \end{aligned} \right\}$$

Вычитая уравнения, входящие в системы, друг из друга, получаем

$$\Delta y'_2 = y'_3 - y'_2 = \Delta x' (x'_3 + x'_2) D / 2 z^2 \alpha; \quad (6)$$

$$\Delta y'_1 = y'_2 - y'_1 = \Delta x' (x'_2 + x'_1) D / 2 z^2 \alpha, \quad (7)$$

а вычитая из уравнения (6) уравнение (7) —

$$\Delta y'_2 - \Delta y'_1 = \Delta x' (x'_3 - x'_1) D / 2 z^2 \alpha.$$

С учетом того, что  $x'_3 - x'_1 = 2\Delta x'$ , упрощаем последнее выражение:

$$\begin{aligned} \Delta y'_2 - \Delta y'_1 &= (\Delta x')^2 D / z^2 \alpha, \\ D &= (\Delta y'_2 - \Delta y'_1) z^2 \alpha / (\Delta x')^2. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, определив по полученному изображению разности координат трех точек, можно относительным способом определить диаметр цилиндра.

**Эксперимент.** Для экспериментальной оценки предложенного метода был собран макет измерительной установки (рис. 4). В качестве контролируемого объекта был использован калиброванный цилиндр диаметром 13 мм с неотражающей поверхностью, изготовленный с допуском h9.

Регистрация муаровых полос производилась цифровой камерой со встроенным объективом. Поэтому для того чтобы оценить размер пиксела изображения, на матовый экран наносился тест-объект. Расстояние от объекта до матового экрана выбиралось исходя из условия наблюдения дифракции Фраунгофера:  $z \geq a^2 / \lambda$ .

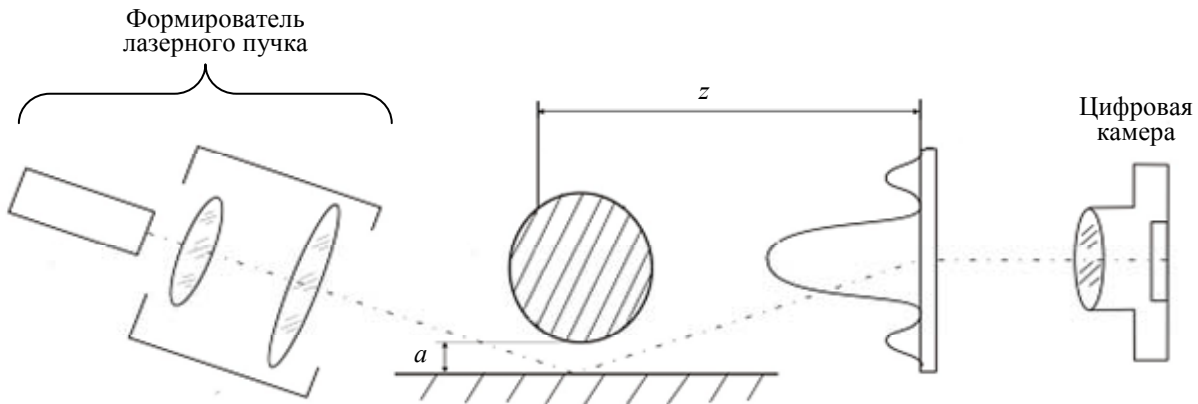


Рис. 4

На данной установке были проведены измерения диаметра цилиндра по приведенной выше методике. Погрешность измерения составила порядка 3 %. Такая достаточно большая погрешность может быть объяснена погрешностью измерения расстояния  $z$  и существенной ошибкой измерения координат точек минимумов полосы. Метод, основанный на определении минимума как центра тяжести фигуры, теоретически дает погрешность измерения сдвига полосы порядка 0,8 %, однако на практике эта погрешность в значительной степени зависит от уровня шума. Погрешность измерения расстояния  $z$  обусловлена трудностью определения положения эквивалентных плоскостей. Эта ошибка может быть уменьшена путем использования цилиндрического фурье-объектива. В этом случае положение эквивалентных плоскостей относительно линзы не оказывает влияния на параметры муаровой картины.

**Заключение.** Предложенный метод обработки муаровых полос основан на использовании параметрического уравнения, связывающего изменение формы муаровых полос с геометрической формой контролируемого объекта. Экспериментальным путем доказана возможность применения данного метода для измерения диаметров цилиндров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Санкт-Петербурга, грант № 28-04/18.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров В. Н., Иванов А. Н. Использование муарового эффекта для создания высокоточных дифракционных систем контроля геометрических параметров объектов // Тр. VIII Междунар. конф. „Прикладная оптика — 2008“. СПб: ГОИ им. С. И. Вавилова, 2008. Т. 1. С. 96—100.
2. Грейсх Г. И., Ежов Г. И., Земцов А. Ю., Степанов С. А. Разработка методов и программных средств подавления шумов в интерферограммах на этапе их предварительной обработки // Компьютерная оптика. 2005. Т. 28.

#### Сведения об авторах

- Александр Николаевич Иванов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: i\_off@mail.ru
- Юрий Александрович Каракулев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

**Виталий Михайлович Михайлов** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов;  
E-mail: mynameisvitalik@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов

Поступила в редакцию  
26.04.11 г.

УДК 681.4.07

А. М. БУРБАЕВ, В. В. ЗЮЗИН, М. Г. ЛУКИН, С. А. МАРУСОВ, В. И. МИЩЕНКО

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИСПЕРСИОННОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ НАСТРОЙКЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ТИПА ЦЕНДЕРА — МАХА

Изложены принципы спектральной интерферометрии, рассмотрен механизм формирования муаровых полос при введении дисперсионного элемента на выходе интерферометра. Показано, как использование предлагаемого метода позволяет расширить динамический диапазон регистрации интерференционных полос при поиске нулевой разности хода, а также упростить и ускорить процесс настройки интерферометра на нулевую разность хода интерферирующих пучков.

**Ключевые слова:** принципы спектральной интерферометрии, интерферометр Цендера — Маха, муаровые полосы, волновой цуг, длина когерентности.

**Введение.** Интерференционные методы измерений и исследований находят широкое применение в науке и технике благодаря высокой чувствительности и точности. Интерферометры используются для точных измерений длин и углов, угловых размеров звезд, характеристик оптических поверхностей, показателей преломления сред, спектрального состава исследуемого излучения [1].

Наибольшее распространение получили интерферометры, работающие по принципу двухлучевой интерференции. К классическим интерферометрам этой группы относятся интерферометры Майкельсона, Тваймана — Грина, Жамена, Цендера — Маха и Рождественского.

Предложенный почти одновременно (в 1891 и 1892 гг.) и независимо друг от друга Цендером и Махом интерферометр, принципиальная схема которого приведена на рис.1, обладает рядом преимуществ по сравнению с интерферометрами Майкельсона и Жамена. Прежде всего, это возможность получения контрастной и хорошо освещенной интерференционной картины (с полосами заданной ширины) в плоскости объекта, установленного на произвольном расстоянии от зеркал интерферометра [2]. Данное обстоятельство обусловило возможность использования интерферометра Цендера — Маха для измерения показателей преломления газов, для исследования неоднородностей воздушного потока в аэродинамической трубе, для изучения распределения плотностей газовых потоков вокруг моделей, исследуемых в аэродинамических установках, для изучения температурного поля объекта, для измерения напряжений в моделях при наличии статических и динамических нагрузок [3].

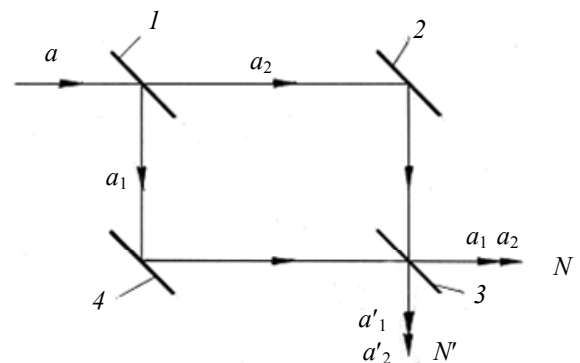


Рис. 1

Однако воспользоваться перечисленными возможностями интерферометра Цендера — Маха можно лишь при условии его юстировки. Основные вопросы, связанные с устройством и юстировкой интерферометров, изложены в трудах наших соотечественников — акад. Д. С. Рождественского [4] и проф. А. Н. Захарьевского [5]. Методика юстировки больших четырехзеркальных двухлучевых интерферометров и, в особенности, интерферометра Цендера — Маха подробно разработана канд. техн. наук А. А. Забелиным в его диссертации [6] и внедрена им на производстве.

В соответствии с этой методикой при юстировке интерферометра Цендера — Маха предусмотрено выполнение трех последовательных этапов:

- 1) предварительная установка элементов интерферометра — грубая, на глаз, без использования каких-либо приспособлений;
- 2) геометрическая юстировка — точная, с помощью вспомогательной зрительной трубы с линзовой насадкой;
- 3) окончательная юстировка — без использования приспособлений, на глаз, но с контролем результатов по наблюдаемой интерференционной картине в монохроматическом свете.

Именно этот, последний, этап юстировки, даже при четком следовании рекомендациям автора методики, представляется операцией сложной и трудоемкой, требующей, кроме глубокого понимания физики явления, непрерывного внимания и некоторых профессиональных навыков.

Напомним, что в результате выполнения первых двух этапов юстировки отклонения соответствующих лучей и соответственных точек на выходе интерферометра характеризуются следующими параметрами:

- а) угол  $\alpha$  между интерферирующими лучами  $a_1$  и  $a_2$  (см. рис. 1) меньше  $10''$ ;
- б) сдвиг этих лучей в поперечном направлении менее  $0,1$  мм;
- в) разность хода  $\delta$  — неравенство путей, пройденных лучами в двух ветвях интерферометра от точки разделения лучей до определенной точки поля, — меньше  $1$  мм.

Только в этом случае можно наблюдать интерференционные полосы в монохроматическом свете. Далее, опытный юстировщик, учитывая вид интерференционной картины, посредством грубой подвижки, например, зеркала 4 (см. рис. 1) вдоль его нормали предпринимает попытку существенно уменьшить разность хода в целях достижения достаточно четких и прямых интерференционных полос в монохроматическом свете. Заметим, что для наблюдения широких интерференционных полос в белом свете остаточные отклонения  $t$ ,  $\Delta$  и  $\alpha$  должны быть близки к нулю, при этом параметры  $t$  и  $\Delta$  не должны превышать нескольких долей микрометра, а  $\alpha$  — нескольких долей угловой секунды.

Сложность этого этапа юстировки состоит еще и в том, что при изменении параметра  $\Delta$  за счет тонкого поступательного перемещения пластины 1 (см. рис. 1) с помощью механизма дифференциального винта изменяются и параметры  $\alpha$  и  $t$ . Это объясняется тем, что угол падения луча на пластину составляет примерно  $45^\circ$ , а направляющие, по которым перемещается пластина, не являются идеальными с точки зрения прямолинейности и отсутствия зазоров. Вследствие этого контрастность интерференционной картины ухудшается, а ширина полос становится исчезающе малой или, наоборот, соизмеримой с размером поля.

Для облегчения и ускорения процесса окончательной настройки интерферометра предлагается на его выходе использовать дисперсионный элемент. Еще в 1845 г. французские физики Фуко и Физо провели исследование [7], которое заключалось в наблюдении интерференции света при большой разности хода, при этом они впервые использовали дисперсионный элемент на выходе интерферометра.

**Механизм формирования муаровых полос при некогерентном сложении монохроматических картин.** Обычно при интерпретации интерференционных опытов предполагается, что источник излучает монохроматический свет. Вполне очевидно, что результаты, полу-

ченные для монохроматической идеализации, имеют ограниченное применение. Реальные природные широкополосные, например звездные, источники света в каждом из спектральных компонентов излучают хаотическую последовательность более или менее длинных волновых цугов. Поэтому можно рассматривать реальное излучение как совокупность большого числа монохроматических компонентов (теорема Фурье), имеющих разные частоты.

Пусть свет от источника, используемого в интерференционном эксперименте, разлагается с помощью какого-либо спектрального прибора (призма, дифракционная решетка) на множество монохроматических пучков. Поскольку процесс собственно излучения не является периодическим, в результате формируется „сплошной“ спектр, т.е. набор монохроматических компонентов, частоты которых непрерывно заполняют некоторый спектральный диапазон. Каждая спектральная линия первичного источника создает свою интерференционную картину, распределение интенсивности в которой описывается формулой

$$I(\Delta) = 2I_0 (1 + \cos(k\Delta)),$$

где  $k = \omega/c$  — волновое число;  $I_0$  — равномерная интенсивность волны, которую может создавать только один вторичный источник;  $\Delta$  — разность хода двух интерферирующих волн от вторичных источников до точки наблюдения.

Закон аддитивного сложения интенсивностей спектральных компонентов в интервале волновых чисел  $(k, k + dk)$  определяется как

$$I(\Delta) = 2 \int I_1(k)(1 + \cos(k\Delta))dk,$$

где  $I_1(k)$  — спектральное распределение интенсивности источника,  $I_1(k)dk$  — интенсивность одного из интерферирующих пучков в интервале волновых чисел  $(k, k + dk)$ .

Для любого источника, занимающего спектральный диапазон  $\delta k$ , длину когерентности  $\ell = 2\pi/\delta k$  всегда можно принять за некоторую *эффективную* протяженность волновых цугов. При таком подходе две возможные интерпретации исчезновения интерференционных полос при больших разностях хода — в рамках представлений о хаотической последовательности волновых цугов конечной протяженности или о наложении интерференционных картин, создаваемых отдельными монохроматическими компонентами в спектре излучения, — оказываются эквивалентными [8].

Введение разности хода между интерферирующими пучками эквивалентно задержке одного из них во времени, поэтому способность световых колебаний в одной точке исходного пучка к интерференции после его разделения на два пучка и последующего их соединения при некоторой разности хода называется *временной когерентностью*. Максимальная разность хода, при которой возможна интерференция, называется *длиной когерентности излучения*  $\ell$ , а соответствующее ей запаздывание — *временем когерентности*  $\tau = \ell/c$ .

Условие временной когерентности световых колебаний можно записать в виде

$$\Delta < \ell = c\tau.$$

Уменьшение когерентности световых колебаний с увеличением временной задержки, т.е. уменьшение различимости интерференционных полос при возрастании разности хода связано с конечной шириной спектральной линии источника квазимонохроматического света. Такое излучение можно рассматривать как совокупность не скоррелированных между собой отдельных монохроматических волн, частоты которых заполняют некоторый интервал  $\delta\omega$ , малый по сравнению со средней частотой  $\omega$ . Каждая монохроматическая волна из этой совокупности создает в интерферометре свою картину полос, и полное распределение освещенности определяется простым наложением этих картин.

При малых разностях хода интерферирующих лучей (порядка нескольких длин волн) положение полос в картинах, создаваемых отдельными монохроматическими составляющими,

практически одинаково. Поэтому полосы суммарной картины отчетливы. По мере увеличения разности хода отдельные монохроматические картины полос смещаются одна относительно другой из-за различия длин волн, и в результате суммарная картина оказывается полностью размытой.

Оценить разность хода, при которой происходит исчезновение полос, можно следующим образом. Примем, что отдельные монохроматические компоненты *равномерно* заполняют спектральный интервал шириной  $\delta\omega$  („прямоугольный“ спектральный контур линии). Разделим мысленно этот интервал на множество пар бесконечно узких спектральных линий, отстоящих по частоте на  $\delta\omega/2$ , т.е. на  $\delta k/2$  по шкале волновых чисел ( $k = \omega/c$ ). Распределение освещенности, формируемое каждой парой, определяется формулой

$$I(\Delta) = 4I_0 [1 + \cos(\delta k \Delta/2) \cos(k\Delta)], \quad (1)$$

в которой  $\delta k$  (расстояние между монохроматическими компонентами) следует теперь заменить на  $\delta k/2$ . Полосы в этой картине пропадают при такой разности хода  $\Delta_{\max} = \ell$ , при которой аргумент первого косинуса в формуле (1) становится равным  $\pi/2$ . Заменяя  $\delta k$  на  $\delta k/2$ , находим

$$\ell = 2\pi/\delta k = \lambda^2/\delta\lambda. \quad (2)$$

Условие исчезновения полос для всех пар монохроматических компонентов, на которые был разделен спектральный интервал  $\delta\omega$ , одинаково. Поэтому при разности хода  $\Delta = \ell$  полосы интерференционной картины размываются.

Формулу (2) можно использовать для оценки длины когерентности и в случае более сложной формы контура спектральной линии квазимонохроматического света, понимая под  $\delta k$  (или  $\delta\lambda$ ) полуширину контура (т.е. ширину на половине высоты). Длине когерентности соответствует максимально возможный порядок интерференции  $m_{\max} = \lambda/\delta\lambda = \omega/\Delta\omega$ , которого можно достичь в квазимонохроматическом свете со спектральной шириной  $\delta\omega$  (или  $\delta\lambda$ ).

Для белого света (солнце, лампа накаливания) и визуального наблюдения эффективный диапазон длин волн  $\delta\lambda$  простирается приблизительно от 400 до 700 нм, т.е.  $\delta\lambda \sim \lambda$ . В этом случае  $m_{\max} \sim 1$  и интерференционные полосы, казалось бы, наблюдаться не должны. Действительно, приемник излучения, обладающий примерно одинаковой чувствительностью на различных участках спектра, например термозлемент, покажет при перемещении в поле зрения поперек полос почти равномерное распределение освещенности. Однако глаз человека представляет собой селективный приемник с сильно изменяющейся чувствительностью в зависимости от длины волны, что обуславливает преимущество некоторых длин волн.

Визуальное наблюдение полос в белом свете облегчается и благодаря способности зрения различать цвет, а не только интенсивность света. Поэтому в белом свете глаз различает около десятка окрашенных интерференционных полос. При равной нулю разности хода, т.е. в тех областях, куда две интерферирующие волны приходят в одинаковых фазах, условие максимума выполняется для всех длин волн. В этой области формируется ахроматическая (т.е. неокрашенная) светлая полоса. По обе стороны от нее находятся окрашенные максимумы и минимумы, цвета которых постепенно тускнеют по мере удаления от полосы нулевого порядка, а еще дальше поле зрения воспринимается глазом как равномерно освещенное белым светом. Таково происхождение красивых интерференционных цветов в тонких пленках масла или бензина на поверхности воды.

Картина интерференционных полос в белом свете иногда может оказаться полезной при интерферометрических измерениях, так как с ее помощью можно легко обнаружить для монохроматического света полосу нулевого порядка, соответствующую равной нулю разности хода. Для этого достаточно временно заменить монохроматический источник источником белого света при неизменном расположении остальных оптических элементов. Благодаря уникальному свойству картины интерференции в белом свете его можно использовать для



устранения неопределенности в метрологических системах фазирования составных зеркал адаптивных астрономических телескопов и в линиях задержки звездных интерферометров при определении нулевой разности хода интерферирующих пучков.

**Результаты экспериментального исследования.** Проверка эффективности и простоты настройки интерферометра с использованием дисперсионного элемента выполнялась на макете интерферометра Цендера — Маха, установленном в Лаборатории сборки и юстировки оптико-электронных приборов кафедры компьютеризации и проектирования оптических приборов СПбГУ ИТМО. В качестве диспергирующих элементов использовались отражательная и прозрачная дифракционные решетки с частотой штрихов соответственно 300 и 100 на 1 мм. Место установки дифракционной решетки определялось удобством осуществления юстировочных подвижек при одновременном наблюдении за изменяющейся картиной как в направлении  $N$ , так и в направлении  $N'$  (см. рис. 1).

В качестве источника света был выбран штатный коллиматор, в фокальной плоскости которого установлена низковольтная лампа накаливания. Дифракционная решетка преобразует в спектр изображение спирали, фактически — в горизонтальную полосу.

Следует подчеркнуть, что использование дисперсионного элемента при настройке интерферометра не исключает выполнения первых двух этапов его юстировки. Более того, разность хода в интерферирующих пучках должна быть сведена к минимуму, определяемому спектральным разрешением применяемого элемента. Чем выше разрешение, тем большая разность хода может быть допущена. При использовании в эксперименте отражательной решетки уже при разности хода в ветвях примерно 0,5 мм удалось на пределе разрешения для глаза зарегистрировать муаровые полосы в одном из порядков спектра, расположенном вблизи максимума излучения.

За счет перемещения пластины  $I$  (см. рис. 1) осуществлялось уменьшение разности хода в ветвях интерферометра. При этом уменьшалась и частота муаровых полос. Характер изменения частоты муаровых полос по мере уменьшения разности хода в ветвях интерферометра иллюстрируется фотоизображениями картин, приведенными на рис. 2.

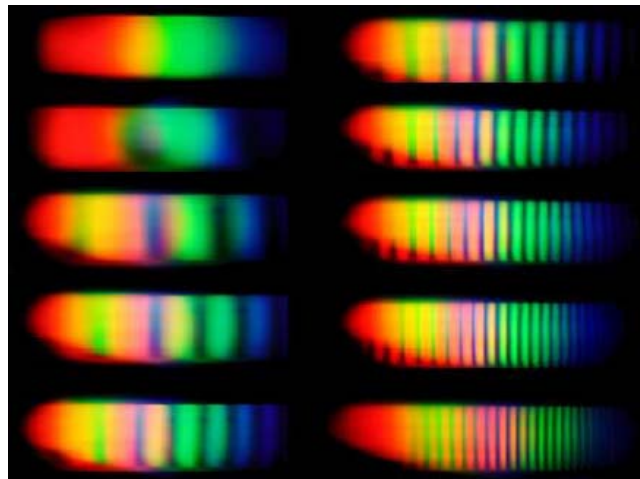


Рис. 2

При юстировке следовало сохранять контрастность полос и перпендикулярность их спектральной оси, положение которой определяется положением дифракционной решетки. Для этой цели, как и в исходной методике [6], осуществлялись угловые подвижки светоделительных пластин  $I$  и  $3$  (см. рис. 1). При достижении 2—3 полос, при выводе решетки из хода лучей, на выходе интерферометра можно было наблюдать интерференционные полосы белого света с ахроматической белой полосой, соответствующей нулевой разности хода.

Следует заметить, что при переходе к более высокому порядку спектра разрешение полос при одной и той же разности хода возрастает. Интересно также отметить еще одно свойство муаровых полос. Если в процессе юстировки контрастность муаровых полос или их вертикальное расположение сохранить не удастся, увидеть интерференцию в белом свете все-таки возможно. При этом полосы оказываются узкими и малоконтрастными. Как и при традиционной юстировке, в данном случае интерференционная картина наблюдается на установленном за пластиной  $l$  белом экране, хорошо освещенном, например, с помощью осветителя ОИ-19.

Для сравнения предлагаемой в настоящей статье методики настройки интерферометра с применяемой в настоящее время [6] (в процессе выполнения лабораторной работы студентами) можно привести следующие цифры. Для преодоления разности хода  $\Delta = 0,5$  мм в ветвях интерферометра потребуется более 300 шаговых перемещений пластины  $l$  с помощью маховичка привода механизма дифференциального винта. При каждом шаге пластина перемещается примерно на 1 мкм. После каждого шага необходимо отпустить маховичок, чтобы исключить всякое усилие и вибрацию, оказываемые на столик с закрепленной на нем пластиной интерферометра. В противном случае появление интерференционной картины в белом свете можно просто не заметить. При этом, как отмечалось выше, необходимо постоянно корректировать положение элементов интерферометра, чтобы не потерять из виду интерференционные полосы в монохроматическом свете.

**Заключение.** При использовании спектрального элемента на выходе интерферометра происходит разложение света на спектральные компоненты в обоих его пучках. При таком сочетании интерферометра со спектрометром возникает особый вид картины спектра, пересеченного темными полосами. По сути, происходит некогерентное сложение периодических распределений интенсивности в монохроматических картинах, приводящее к появлению суммарного муарового эффекта. В результате эффективность поиска интерференционной картины в белом свете с дифракционной решеткой повышается за счет увеличения динамического диапазона регистрации муаровых полос. Применение предложенной методики позволяет значительно упростить и ускорить процесс настройки интерферометра Цендера — Маха.

В исследованиях, результаты которых представлены в настоящей статье, активное непосредственное участие принимал А. Г. Серегин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стафеев С. К., Боярский К. К., Башина Г. Л. Основы оптики: Учеб. пособие. СПб: Питер, 2006. 336 с.
2. Коломийцов Ю. В. Интерферометры. Основы инженерной теории, применение. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
3. Нагибина И. М. Интерференция и дифракция света. Учеб. пособие для вузов. Л.: Машиностроение, 1974. 360 с.
4. Рождественский Д. С. Работа по аномальной дисперсии в парах металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1961.
5. Захарьевский А. Н. Интерферометры. М.: Оборонгиз, 1952. 296 с.
6. Забелин А. А. Методика юстировки больших зеркальных интерферометров типа Цендера: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: ГОИ им. С. И. Вавилова, 1957.
7. Fizeau H., Foucault L. Sur le phenomene des interferences entre deux rayons de lumiere dans le cas de grandes differences de marche // C.R. Del L'academie des sciences. 1845. Vol. 21. P. 1155—1158.
8. Бутиков Е. И. Оптика. СПб: Невский диалект, 2003. 480 с.

#### Сведения об авторах

**Амир Маруанович Бурбаев**

— доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов;  
E-mail: aburbaev@mail.ru

- Вадим Васильевич Зюзин** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов
- Максим Геннадьевич Лукин** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов
- Сергей Александрович Марусов** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов
- Владимир Иванович Мищенко** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов

Поступила в редакцию  
26.04.11 г.

УДК 621.384.3: 621.31 + 536.521

И. Т. РАЗУМОВСКИЙ

## ПИРОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПЕРЕГРЕВА СКРУТОК ПРОВОДОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Предлагается пирометр для контроля перегрева скруток проводов в линиях электропередач, установленный на автомобильной платформе и состоящий из измерительного инфракрасного канала, визуального оптико-телевизионного канала и привода наведения. Прибор обслуживается оператором. Уровни контроля перегрева — 200, 400 и 600 °С при температурном разрешении не хуже 2 °С.

**Ключевые слова:** пирометр, инфракрасный канал, визуальный канал.

**Введение.** Выход из строя участка линии электропередач не только создает неудобства для потребителей, но и вызывает серьезные финансовые проблемы у предприятий, эксплуатирующих данное энергооборудование. Известно, что из-за перепадов температур окружающей среды или внешних механических воздействий происходят обрывы проводов, при их же восстановлении возникают соединения, так называемые *скрутки*. Однако под действием неблагоприятных атмосферных условий скрутки окисляются, в результате чего их электрическое сопротивление резко возрастает, скрутки начинают перегреваться, и это снова приводит к аварийным ситуациям — разрыву проводов и отключению освещения.

Для контроля перегрева скруток проводов необходимо использовать диагностическое оборудование. Информативным видом такого оборудования может стать инфракрасный (ИК) пирометр. В настоящее время промышленность выпускает значительное число пирометров, близких по необходимым параметрам [1, 2]. Однако обеспечить контроль перегрева скруток, используя серийную аппаратуру, не удастся.

Рассмотрим основные проблемы, возникающие при решении этой задачи. Первая из них связана с малыми размерами скрутки и достаточно большим до нее расстоянием. Если принять размер излучающей поверхности скрутки равным  $10 \times 80 \text{ мм}^2$ , а среднюю дистанцию до скрутки — 8 м, то требуемое поле зрения прибора будет не более  $4,2'$ , т.е. показатель визирования прибора должен быть не менее 1:800. Столь малое поле зрения требует длиннофокусной инфракрасной оптики.

Вторая проблема вытекает из первой — для захвата измерительной инфракрасной системой столь малого объекта, как скрутка, прибор должен обладать чувствительной визуальной поисковой системой. Для решения этой проблемы необходим точный механический привод с визирной наблюдательной системой, имеющей сменное увеличение (чтобы реализовать большое поисковое поле и малое измерительное поле).

Третья проблема связана с точным совмещением полей зрения как измерительной, так и визуальной систем. Для этого оптические оси этих систем должны быть аксиальны, чтобы исключить их взаимный параллакс. Это не совсем просто, учитывая, что рабочие спектральные диапазоны измерительной (8—14 мкм) и визуальной (0,4—0,76 мкм) систем различны.

Обеспечить решение перечисленных проблем позволяет разработанный автором специализированный ИК-пирометр, предназначенный именно для диагностики соединений проводов на трассах линий наружного освещения. По показаниям ИК-пирометра, установленного на автомобильной платформе, ремонтная бригада, проезжая вдоль линий электропередач, дистанционным способом осуществляет контроль всех скруток на перегрев, что позволяет своевременно выявить и ликвидировать предаварийную ситуацию.

**Устройство специализированного пирометра.** Предлагаемый прибор, размещаемый в кузове микроавтомобиля с возможностью питания от его бортовой сети, состоит из измерительного инфракрасного канала 1 (рис. 1), выполненного по классической схеме. По сигналу инфракрасного канала оценивается температура перегрева скрутки ( $T_n$ ) относительно температуры окружающей среды в диапазоне от 200 до 600 °С при температурной чувствительности 2,5 °С. Результат перегрева скрутки выводится на индикатор 2, который представляет собой три разноцветных светодиода, загорающиеся в зависимости от полученного результата: зеленый светодиод —  $T_n < 200$  °С — рабочее состояние соединения; желтый светодиод —  $T_n = 200 \dots 400$  °С — опасная ситуация, требующая быстрого устранения неисправности линии; красный светодиод —  $T_n > 600$  °С — аварийная ситуация, требующая немедленной ликвидации неисправности. Грубое наведение прибора на искомую скрутку осуществляется оператором посредством механического визира 3, и далее поиск ведется при помощи оптико-телевизионного визира 4 с отображением получаемой информации на экране монитора 5 (в поле зрения выводятся два смежных изолятора, провода и скрутки).

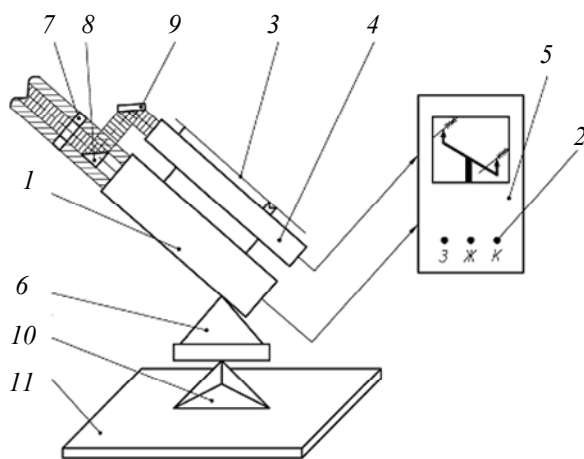


Рис. 1

Поиск скрутки оператор осуществляет вначале при малом увеличении. Окончательное наведение на скрутку достигается при наибольшем увеличении визуального канала.

Непрерывное условие правильной работы прибора — согласованность полей зрения измерительного и визуального каналов, что достигается точной их юстировкой при помощи подвижек призмы 8 и зеркала 9.

Пирометр установлен на двухкоординатном поворотном устройстве 6. Дополнительным необходимым элементом прибора служит устройство 10 его крепления к полу 11 автомобиля.

**Измерительный инфракрасный канал.** Измерительный инфракрасный канал (рис. 2) работает следующим образом. Инфракрасное излучение от исследуемой поверхности проходит через зеркальный объектив 1, оптический фильтр 2, прозрачный в области 8—14 мкм, вибратор 3 и фокусируется на фотоприемнике 5. Электрический сигнал  $U$  с приемника излучения подается в блок обработки 6, где реализуется синхронное детектирование. С помощью генератора опорного напряжения 4 вырабатываются импульсы тока, которые управляют ра-

ботой электронного реле в блоке 6. Из блока обработки сигнал поступает на пороговое устройство 7 и далее на трехцветный светодиодный индикатор 8.

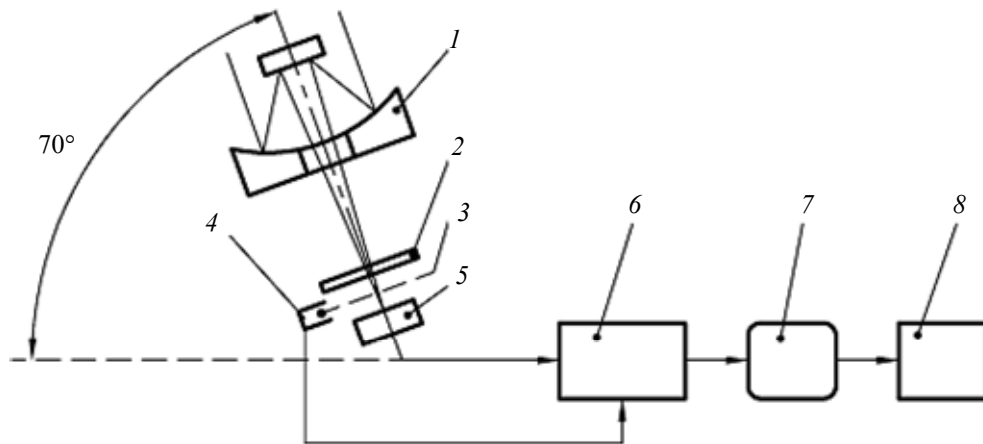


Рис. 2

*Основные параметры измерительного канала.* Определим угловое поле ( $\omega_{об}$ ) объекта измерения (скрутки) по следующей формуле:  $\text{tg}\omega_{об} = a / L$ , где  $a$  — наименьший размер объекта,  $L$  — расстояние до объекта. Пусть размер скрутки  $10 \times 80 \text{ мм}^2$ , расстояние до объекта 8 м. Тогда, подставив численные значения, получим

$$\text{tg}\omega_{об} = 10 / 8000 = 0,00125, \quad \omega_{об} = 4,2'.$$

По этой же формуле определим угол между двумя ближайшими изоляторами при наблюдении их на дистанции 8 м:  $\text{tg}\omega_{из} = l / L'$ , где  $l = 250 \text{ мм}$  — расстояние между двумя изоляторами,  $L'$  — расстояние до изоляторов. Таким образом, получаем

$$\text{tg}\omega_{из} = 250 / 8000 = 0,03125, \quad \omega_{из} = 1^\circ 45'.$$

Исходя из полученных данных максимальное поле зрения визуального канала должно быть не менее  $1^\circ 45'$ , а минимальное — не более  $4,2'$ .

В разработанном приборе использован пироэлектрический приемник излучения БП2-6 с диаметром чувствительной площадки  $0,3 \text{ мм}$ . Чтобы при оценке температуры перегрева показания измерительного канала оставались независимыми от расстояния до скрутки, необходимо реализовать так называемый случай протяженного объекта. Для этого размер изображения скрутки ( $a'$ ) при любых измерениях должен всегда превышать размер чувствительной площадки приемника излучения. С учетом запаса на разброс размеров скруток примем  $a' = 0,5 \text{ мм}$ . При заданном размере скрутки ( $10 \times 80 \text{ мм}^2$ ) фокусное расстояние объектива измерительного канала определяется в соответствии с условием  $\frac{a}{L} = \frac{a'}{f'} \Rightarrow f' = \frac{8000 \cdot 0,5}{10} = 400 \text{ мм}$ . При таком значении  $f'$  на скрутке вырезается участок шириной не более  $4 \text{ мм}$ .

Оптические материалы в радиометрических приборах должны соответствовать выбранному для работы участку спектра ( $8\text{--}14 \text{ мкм}$ ), а также эксплуатационным требованиям, предъявляемым к аппаратуре. Поэтому оптика, наряду с высокой прозрачностью, должна быть не критичной к перепадам температур и негигроскопичной.

Центральная зона входного окна (иллюминатора) 7 (см. рис. 1) диаметром  $35 \text{ мм}$  выполнена прозрачной только для видимых лучей. Поэтому для создания визуального канала аксиальным измеряемому каналу в последнем применен зеркальный объектив, который без световых потерь согласуется с кольцевой зоной иллюминатора, прозрачной лишь в ИК-диапазоне (материал ИКС-29).

Объектив пирометра представляет собой сферическую зеркальную поверхность с контротражателем. Диаметр главного зеркала конструктивно выбран минимальным, размером 57 мм, чтобы его относительное отверстие было не хуже 1:7. Этого достаточно, чтобы аберрации объектива не увеличивали размеры изображения скрутки более чем на 20—30 %. Эффективный световой диаметр объектива при этом равен  $D=45$  мм.

Минимальная разность температур двух соседних участков объекта, регистрируемая пирометром, может быть оценена из выражения [3]

$$\Delta T_{\min} = \frac{\mu\Phi}{k\varepsilon\sigma T^3 \alpha (1 - \exp(-t_{\text{и}}/\tau))} \frac{f'}{D^2} \sqrt{\frac{\Delta f_{\text{ш}}}{\kappa}} = 2,5 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где  $\mu = 1$  — коэффициент отношения сигнал/шум;  $\Phi = 6,3 \cdot 10^{-8}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>·см — пороговая чувствительность приемника;  $k = 0,3$  — коэффициент использования излучения фотоприемником;  $\varepsilon = 0,2$  — коэффициент излучения объекта;  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана;  $T = 473$  К — температура объекта;  $\alpha$  — угловая разрешающая способность:  $\alpha = d/f' = 0,3/400 = 0,00075$  рад,  $d$  — размер чувствительной площадки приемника излучения;  $t_{\text{и}} = 5$  с — длительность самого короткого импульса излучения;  $\tau = 5$  с — постоянная времени системы приемник—усилитель;  $\Delta f_{\text{ш}} = 0,1$  Гц — частотная шумовая полоса усилительного тракта;  $\kappa = 1$  — число чувствительных элементов приемника излучения.

Для выделения необходимого интервала спектра использован дисперсионный фильтр со следующими параметрами:  $\lambda_{\max} = 9,8$  мкм,  $\Delta\lambda = 5,0$  мкм, коэффициент пропускания фильтра 55 %.

Инструментальная температурная погрешность пирометра оценивается следующим выражением:

$$\delta T = \sqrt{\delta T_{\text{ш}}^2 + \delta T_{\text{гр}}^2 + \delta T_{\text{р}}^2},$$

где  $\delta T_{\text{ш}}$  — погрешность, возникающая из-за шума системы;  $\delta T_{\text{гр}}$  — погрешность градуировки прибора;  $\delta T_{\text{р}}$  — погрешность, вносимая регистрирующим прибором.

Численное значение инструментальной погрешности оценивается как

$$\delta T = \sqrt{\delta T_{\text{ш}}^2 + \delta T_{\text{гр}}^2 + \delta T_{\text{р}}^2} = 3,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

**Визуальный оптико-телевизионный канал.** С помощью визуального канала осуществляется наведение на объект измерения — скрутку. Обычно на высоковольтном столбе имеется четыре провода и четыре изолятора, а значит, и четыре скрутки. Путем физического моделирования визуализации скрутки было установлено, что увеличение наблюдательного канала должно быть не меньше  $30^\times$ . Однако при таком увеличении из-за малого поля зрения системы одновременно наблюдать хотя бы две скрутки не удастся, что необходимо для правильной идентификации принадлежности скрутки к тому или иному проводу. Отсюда следует, что визуальный канал должен иметь перепад увеличений не менее  $2^\times$ .

Визуальный канал представляет собой телескопическую систему с необходимостью излома визирной оси по эргономическим соображениям. Требование излома оси объясняется тем, что объект находится на расстоянии примерно 8 м под большим углом к прибору и оператору, осуществляющему наблюдение. Для реализации комфортных условий наблюдения было решено применить оптико-телевизионный канал, более „гибкий“ по конфигурации.

Оптико-телевизионный канал (рис. 3) состоит из панкратического прицела I, где 1 — объектив прицела, 2 — система смены увеличения в прицеле, 3 — окуляр прицела, и видео-передающей телекамеры II, где 4 — объектив минивидеокамеры, 5 — ПЗС-матрица, 6 — телемонитор.

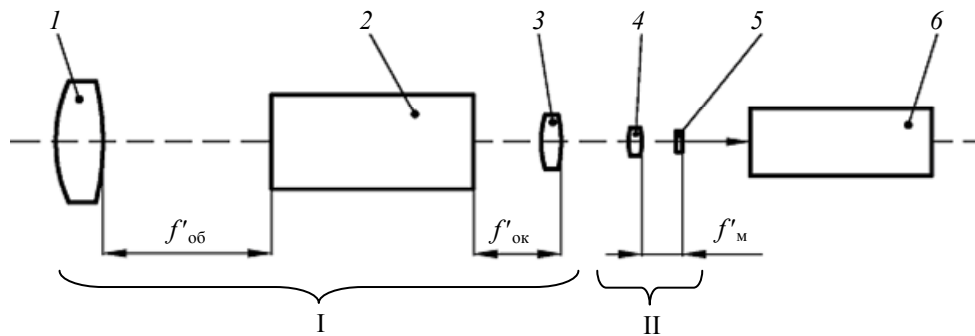


Рис. 3

Для уменьшения затрат на создание прибора в качестве зрительной трубы был применен панкратический прицел ПО Veber (3—7)×20 с перепадом увеличения от 3<sup>×</sup> до 7<sup>×</sup>. Для визуализации поля зрения использован черно-белый монитор с электронно-лучевой трубкой с диагональю экрана 138 мм.

Для обеспечения необходимого максимального увеличения визуального канала был выбран микрообъектив с фокусным расстоянием  $f'_M = 25$  мм.

*Расчет оптического увеличения визуального канала.* Увеличение панкратического прицела  $\Gamma_1 = 3^{\times} \dots 7^{\times}$ . Увеличение оборачивающей системы оптико-телевизионного канала определяется по формуле  $\Gamma_2 = f'_M / f'_{ок}$ , где  $f'_{ок} = 50$  мм — фокусное расстояние окуляра панкратического прицела,  $f'_M = 25$  мм; таким образом,  $\Gamma_2 = 25 / 50 = 0,5^{\times}$ .

Минимальное оптическое увеличение оптико-телевизионного канала  $\Gamma_{min} = \Gamma_1 \Gamma_2 = 3 \cdot 0,5 = 1,5^{\times}$ , а максимальное —  $\Gamma_{max} = \Gamma_1 \Gamma_2 = 7 \cdot 0,5 = 3,5^{\times}$ .

Определим электронное увеличение минивидеокамеры. Размер ПЗС-матрицы, согласно паспортным параметрам минивидеокамеры,  $10 \times 12$  мм<sup>2</sup>. Размер экрана монитора  $100 \times 95$  мм<sup>2</sup>. Так как диагональ ПЗС-матрицы  $l_{ПЗС} = \sqrt{10^2 + 12^2} = 15,6$  мм, а диагональ экрана монитора  $l_M = \sqrt{100^2 + 95^2} = 138$  мм, то электронное увеличение  $\beta_{эл} = l_M / l_{ПЗС} = 138 / 15,6 = 9^{\times}$ .

Общее увеличение оптико-телевизионного канала следующее:

— минимальное:  $\Gamma = \Gamma_{min} \beta_{эл} = 1,5 \cdot 9 = 13,5^{\times}$ ;

— максимальное:  $\Gamma = \Gamma_{max} \beta_{эл} = 3,5 \cdot 9 = 31,5^{\times}$ .

**Методика измерения.** В разработанном приборе для удобства предусмотрено грубое и точное наведение на скрутку. Используется готовый привод наведения. Угловая погрешность механизма наводки составляет 1,8'.

1. С помощью механического визира грубой наводки, установленного на корпусе прибора, осуществляется наведение на объект измерения (скрутку) с использованием в поворотном устройстве механизма ускоренной наводки. Механический визир представляет собой мушку и целик.

В результате грубого наведения изображение скрутки должно попасть в поле зрения визуального канала при его минимальном увеличении 13,5<sup>×</sup>. Дальнейший контроль наведения осуществляется по монитору.

2. При помощи поворотного устройства точного наведения изображение скрутки приводится в центр поля зрения.

3. Путем изменения масштаба увеличения визуального канала до максимального значения ( $31,5^{\times}$ ) осуществляется совмещение изображения скрутки с визирной маркой, нанесенной на экране монитора. Размер визирной марки на мониторе соответствует полю зрения измерительного канала.

4. С включением кнопки „Измерение“ на панели управления производится оценка температуры перегрева скрутки. Результат контроля перегрева скрутки выводится на светодиодный индикатор.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бордонский Г. С. Радиометр инфракрасного диапазона // Приборы и техника эксперимента. 1992. № 4. С. 169—171.
2. Васин А. С. и др. Радиационный пирометр // Изв. вузов. Приборостроение. 1996. Т. 39, № 2. С. 56—58.
3. Разумовский И. Т. Тепловизионные приборы: Учеб. пособие. Л.: ЛИТМО, 1983. С. 53.

#### *Сведения об авторе*

**Игорь Тимофеевич Разумовский** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов;  
E-mail: itraz@rambler.ru

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов

Поступила в редакцию  
26.04.11 г.



А. Н. ИВАНОВ

**КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА  
ПО ПОЛОЖЕНИЮ ТОЧЕК ПЕРЕГИБА  
ДИФРАКЦИОННОЙ КАРТИНЫ ФРАУНГОФЕРА**

Предложен метод оценки размера контролируемого объекта по положению точек перегиба главного максимума дифракционной картины. Показано, что метод обладает высокой чувствительностью к изменению размера объекта и позволяет проводить измерения с погрешностью до 0,1 мкм.

*Ключевые слова:* дифракция, точки перегиба, измерение геометрических параметров.

**Введение.** Для точного контроля изделий малого размера иногда применяется дифракционный метод измерений. В реализующих метод приборах для освещения контролируемого объекта используется когерентное излучение лазера, в результате чего в дальней области формируется дифракционная картина Фраунгофера. Преимуществом таких приборов являются относительная простота конструкции, невысокие требования к оптике, увеличение чувствительности с уменьшением размера объекта.

Определение размера объекта по дифракционной картине Фраунгофера заключается в том, что по функции распределения интенсивности  $I(x)$  вычисляются координаты ее минимумов. Затем определяется коэффициент, связывающий эти координаты с размером объекта. Анализ дифракционных методов измерений показал, что их доминирующей погрешностью является ошибка определения координат точек минимумов — чувствительность сигнала  $dI(x)/dx$  в их окрестности близка к нулю, что приводит к значительной погрешности определения положения минимума [1—3].

На основе методики, предложенной в работе [4], автором настоящей статьи было получено выражение, связывающее разность интенсивностей на соседних пикселах ПЗС-приемника в окрестности минимума дифракционной картины с параметрами измерительной схемы:

$$\Delta I \approx \frac{2d^2 a^2 I_0}{N^2 \lambda^2 (f')^2}, \quad (1)$$

где  $N$  — порядок минимума,  $d$  — размер пиксела,  $a$  — размер объекта,  $f'$  — фокусное расстояние объектива; анализ этого выражения показал, что в большинстве случаев нельзя однозначно определить пиксел, соответствующий минимуму: ошибка составляет  $\pm 2$ —3 пкс.

**Анализ дифракционной картины.** Определим координаты точек дифракционной картины на объекте в форме щели, в которых чувствительность приемника достигает максимального значения. Распределение интенсивности описывается выражением

$$I(U) = \sin^2 U / U^2, \quad (2)$$

где  $U = k a x / 2 f'$ ,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число.

Определим координаты точки, в которой модуль первой производной функции (2) принимает максимальное значение:  $|dI(U)/dU| = \max$ . Отсюда следует, что максимальная чувствительность  $I'(U) = 0,54$  наблюдается в точках с координатами  $U_2 = 1,303$  и  $U_1 = -1,303$ . Эти точки соответствуют точкам перегиба главного максимума дифракционной картины:

см. рис. 1, здесь кривая 1 соответствует исходному распределению интенсивности, кривые 2 и 3 — первой и второй производным.

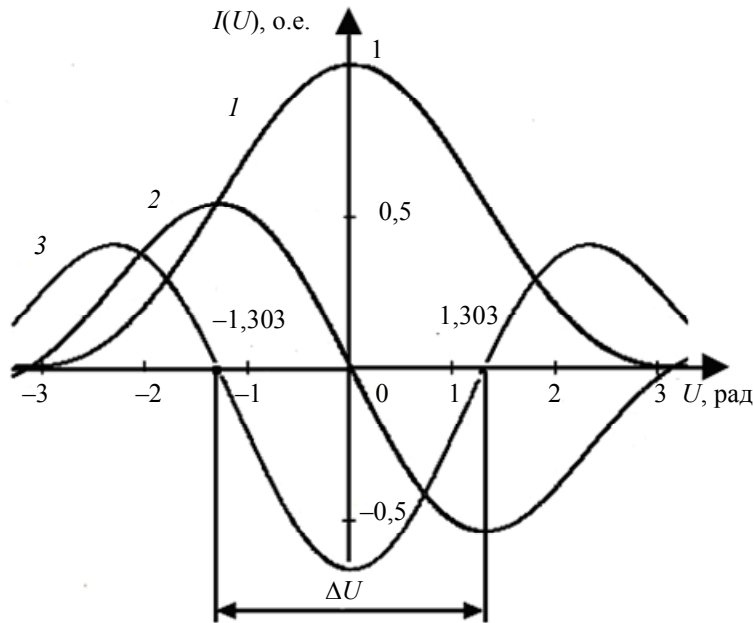


Рис. 1

Разность интенсивностей на соседних пикселах ПЗС-приемника в их окрестности описывается выражением

$$\Delta I \approx \frac{2,2 d a I_0}{\lambda f'} \quad (3)$$

Сравнение выражений (1) и (3) показывает, что при наличии точек перегиба разность интенсивностей на соседних пикселах возрастает на два порядка: это гарантирует обнаружение точки перегиба с погрешностью  $\pm 1$  пкс.

В ходе исследований была определена зависимость (при  $f' = 25$  мм и  $\lambda = 0,63$  мкм) чувствительности положения точек перегиба от размера объекта (рис. 2, кривая 1): как и для точки минимума 1-го порядка (кривая 2), она возрастает с уменьшением размера объекта.

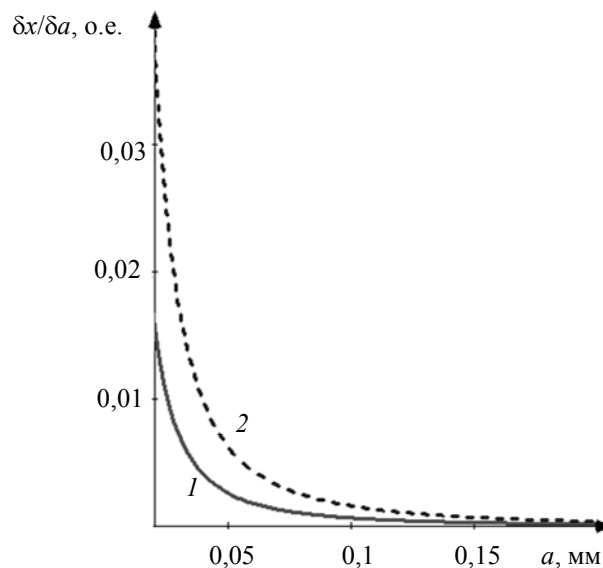


Рис. 2

Если измерить разность линейных координат точек перегиба  $\Delta x = x_2 - x_1$ , то она будет связана с априори известной, согласно выражению (2), разностью угловых координат этих

точек  $\Delta U = U_2 - U_1 = 2,606$  простой зависимостью  $\Delta U = k a \Delta x / 2 f'$ . Отсюда можно определить размер объекта:

$$a = 2 \Delta U f' / k \Delta x = 5,212 f' / k \Delta x. \quad (4)$$

**Экспериментальное исследование.** Для проверки предложенного алгоритма была собрана экспериментальная установка (рис. 3), состоящая из лазера 1 (ЛГН-5), спектральной щели 2 с шагом раскрытия 1 мкм, объектива 3 с фокусным расстоянием  $f' = 25$  мм и ПЗС-камеры 4 (792×576 пкс).

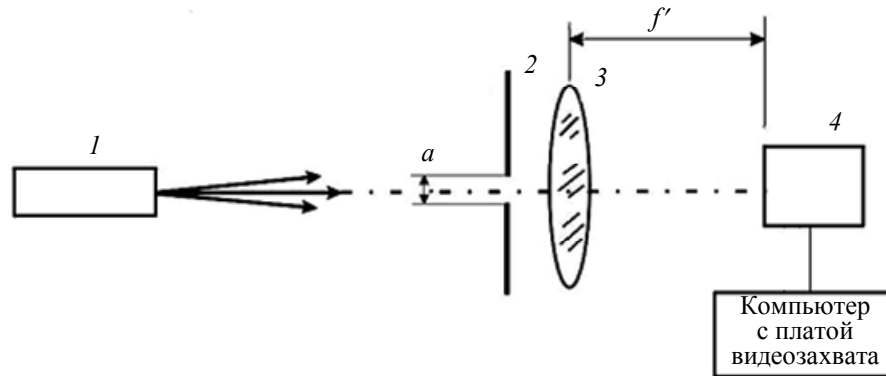


Рис. 3

В ходе эксперимента осуществлялась регистрация дифракционных картин на щели, ширина которой изменялась в диапазоне от 40 до 70 мкм с шагом 2 мкм. Главный максимум дифракционной картины подвергался предварительной обработке в целях подавления шумов. В качестве фильтра использовался фильтр Гаусса, ширина которого на высоте 0,606 от максимального значения соответствовала 0,25 ширины главного максимума на той же высоте [5].

Затем главный максимум численно дифференцировался [6] с помощью интерполяционной формулы Ньютона:

$$I'_i \approx [(I_{i+1} - I_i) - (I_{i+1} - I_i)^2 / 2 + (I_{i+1} - I_i)^3 / 3] / h,$$

где  $i$  — номер элемента ПЗС-приемника,  $I_i$  — интенсивность сигнала на  $i$ -м элементе,  $h$  — дискретность ПЗС-приемника ( $h = 1$  пкс).

На рис. 4 показаны экспериментально полученные сечение главного максимума (кривая 1) и его первая производная (кривая 2) для щели шириной 70 мкм. Координаты экстремумов полученной функции соответствуют координатам точек перегиба.

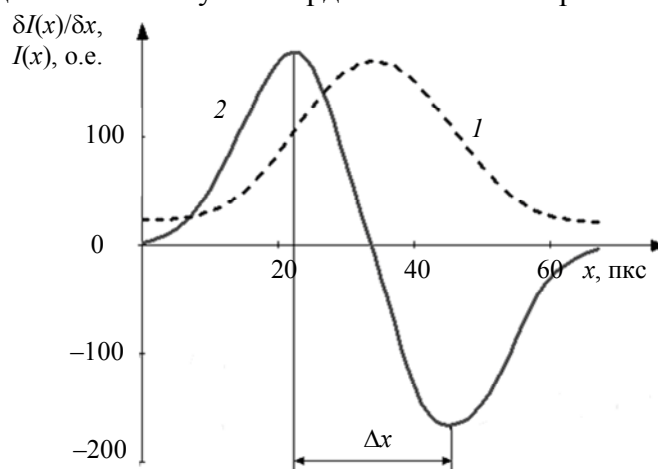


Рис. 4

Для определения положения экстремумов производной с субпиксельной точностью была осуществлена аппроксимация первой производной в окрестности ее экстремумов методом наименьших квадратов, что позволило определить ее положение с погрешностью

$\pm 1/5$  пкс [7]: см. рис. 5, здесь 1 — исходная дискретная функция, 2 — полученная аппроксимированная функция. В качестве аппроксимирующей функции была взята производная от функции, описывающей распределение интенсивности в дифракционной картине. Далее определялась разность  $\Delta x$  и по выражению (4) вычислялась ширина щели.

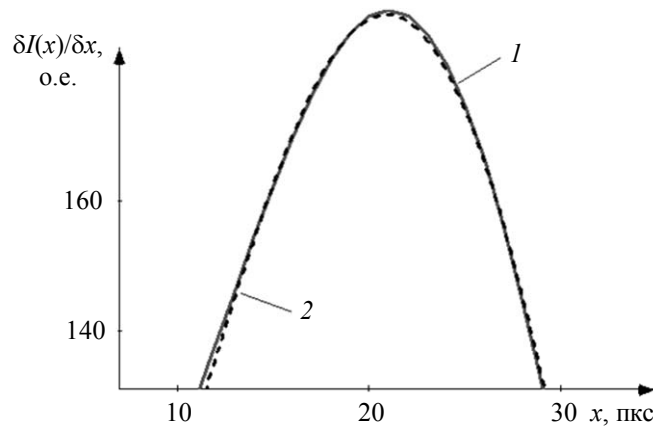


Рис. 5

Ниже приведены результаты измерения ширины щели; погрешность измерения составила 0,3—1 %.

Ширина щели, мкм	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70
Погрешность измерения, мкм	0,3	0,3	0,4	0,1	0,3	0,2	0,2	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

**Заключение.** Предложен метод измерения геометрических параметров объекта по положению точек перегиба дифракционных картин, которые обладают высокой чувствительностью при их регистрации фотоприемником. Несложные преобразования дифракционной картины позволяют надежно и с хорошей точностью определить координаты точек перегиба.

Выявлена зависимость между координатами точек перегиба и размером контролируемого объекта и проведены экспериментальные исследования, подтвердившие правильность теоретических расчетов. Показана целесообразность использования метода для контроля объектов малого размера, когда на площадке ПЗС-приемника размещается только главный максимум дифракционной картины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров В. Н., Линьков А. Е. Дифракционные методы контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптич. журн. 2002. Т. 69, № 2. С. 76—81.
2. Власов Н. Г., Кулиш С. М. Нелинейная цифровая обработка дифракционных картин // Мир техники кино. 2008. № 8. С. 41—42.
3. Госьков П. И., Грозов В. И., Пронин С. П., Якунин А. Г. Особенности обработки дифракционных картин ПЗС-фотоприемником // Автометрия. 1987. № 3. С. 114—116.
4. Сачков Д. Ю. Влияние дискретной структуры фотоприемника на погрешность интерференционного измерения // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2008. Вып. 49. С. 67—73.
5. Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Земцев А. Ю., Степанов С. А. Разработка методов и программных средств подавления шумов в интерферограммах на этапе их предварительной обработки // Компьютерная оптика. 2005. Т. 28. С. 140—144.
6. Исаков В. Н. Элементы численных методов. М.: АCADEMIA, 2003.

7. Пальчик О. В., Андреев В. Г. Обработка данных триангуляционного измерителя // Цифровая обработка сигналов и ее применения: Материалы докл. VI Междунар. конф. М., 2004. Т. 2. С. 197—200.

**Сведения об авторе**

**Александр Николаевич Иванов**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов;  
E-mail: i\_off@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов

Поступила в редакцию  
26.04.11 г.

УДК 531.7.082.5: 535.42/44

В. Н. НАЗАРОВ, Ю. А. СОКОЛОВ

**ДИФРАКЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ  
ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ  
С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ МАСШТАБОМ СПЕКТРА ФУРЬЕ**

Исследована возможность создания дифракционного метода контроля линейных и угловых перемещений объектов по схеме с изменяющимся масштабом их спектра Фурье. Представлена математическая модель, описывающая амплитудно-фазовое распределение света в плоскости регистрации, хорошо согласующаяся с экспериментальными результатами.

**Ключевые слова:** дифракция, интерференция, дифракционные измерения.

Дифракционные методы контроля, применяемые при проведении угловых и линейных измерений [1, 2], основаны на получении и анализе дифракционной картины на объекте после его освещения излучением лазера. По этой информации судят о геометрических параметрах или пространственном положении объектов. Так измеряют, например, размеры отверстий, волокон, лент, проводов, контролируют профиль изделий, определяют оптические характеристики сред, проводят автоколлимационные измерения. Известно применение данного метода контроля и в медицине [2—5]. Это обусловлено рядом преимуществ дифракционных измерений перед традиционными: например, большей чувствительностью, простотой реализации, возможностью автоматизации.

Световое возмущение в плоскости регистрации часто описывается спектром Фурье функции амплитудного пропускания контролируемых объектов. Математический аппарат методов дифракции соответствует в этом случае приближению Френеля — Кирхгофа [6]. Для решения ряда задач используют также и геометрическую теорию дифракции [7]. В целом исследован ряд схем дифракционного контроля, определены их метрологические характеристики, составлены алгоритмы измерений.

Представляет интерес создание и исследование новых, не использованных ранее схем контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов — например, схема, приведенная на рис. 1. Предлагаемая система расширяет функциональные возможности схемы с изменяющимся масштабом спектра Фурье контролируемого объекта, размещенного между линзой и ее фокальной плоскостью [8]. Здесь с двух сторон от тонкой линзы 1 установлены объекты 2 и 3 в виде нитей. Как известно, по принципу Бабине, их можно заменить при дальнейшем анализе щелевыми апертурами. На систему под углом  $\alpha$  падает плоский фронт волны коллимированного излучения He—Ne-лазера и освещает объект 2. На объект 3

падает сферический фронт. В задней фокальной плоскости 4 линзы образуется дифракционная картина, подобная картине дифракции на двух щелях. Расстояние между дифракционными полосами в главном максимуме определяется начальным углом  $\omega$ , под которым сходятся нулевые порядки дифракции на щелях, и может быть приближенно оценено как  $t = \lambda/\omega$ .

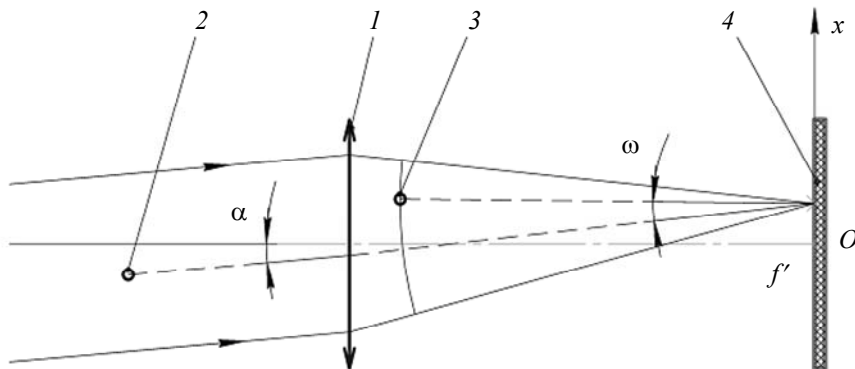


Рис. 1

При линейном смещении нитей 2 и 3 или изменении угла  $\alpha$  падения света на линзу угол схождения  $\omega$  нулевых порядков дифракции изменяется. Это приводит к изменению числа полос в дифракционной картине, смещения которых можно измерить, например, с помощью ПЗС-приемника, что позволяет контролировать положения объектов 2 и 3 или угла  $\alpha$ .

Световое возмущение в фокальной плоскости 4 зависит от расположения объектов 2 и 3 относительно линзы. В работе [8] это учтено только для продольного расположения одиночных объектов вдоль оптической оси. Для практической реализации схемы необходимо учесть и поперечные смещения обоих объектов. Поэтому амплитудно-фазовое распределение света в фокальной плоскости от объекта 2 следует представить в виде приближения Фраунгофера следующим образом:

$$U_1(x) = \frac{\exp\left[\frac{jk}{2f'}x^2\left(1 - \frac{L}{f'}\right)\right]}{j\lambda f'} \int_{-a/2+v_1}^{a/2+v_1} \exp\left[-jk\xi\left(\frac{x}{f'} - \sin\alpha\right)\right] d\xi, \quad (1)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $f'$  — фокусное расстояние линзы;  $x$  — координата в фокальной плоскости линзы;  $L$  — расстояние от объекта 2 до линзы;  $a$  — размер объекта (диаметр первой нити);  $v_1$  — смещение объекта от оси системы.

Множитель  $\exp\left[\frac{jk}{2f'}x^2\left(1 - \frac{L}{f'}\right)\right]$  в формуле (1) учитывает фазовое искажение Фурье-образа, вызванное смещением нити из передней фокальной плоскости линзы.

Амплитудно-фазовое распределение света в фокальной плоскости от объекта 3, расположенного за линзой, также представим в виде приближения Фраунгофера. При этом необходимо учесть, что масштаб Фурье-спектра объекта зависит от расстояния до фокальной плоскости, а сам объект освещается сферической волной:

$$U_2(x) = \frac{1}{j\lambda d} \frac{f'}{d} \exp\left(\frac{jk}{2d}x^2\right) \int_{-b/2+v_2}^{b/2+v_2} \exp\left[-jk\xi\left(\frac{x}{d} - \frac{f'}{d}\sin\alpha\right)\right] d\xi, \quad (2)$$

где  $d$  — расстояние от объекта до экрана;  $b$  — размер объекта (диаметр второй нити);  $v_2$  — смещение объекта от оси системы.

Амплитудно-фазовое распределение света в фокальной плоскости линзы от двух объектов представим в виде

$$U_{\Sigma}(x) = U_1(x) + U_2(x),$$

тогда интенсивность света в плоскости регистрации можно определить как

$$I(x) = U_{\Sigma}(x)U_{\Sigma}^*(x),$$

где  $U_{\Sigma}^*(x)$  — величина, комплексно-сопряженная  $U_{\Sigma}(x)$ , или

$$I(x) = \left( \frac{1}{\pi f'} \right)^2 \left[ \begin{aligned} & \left\{ a \operatorname{sinc} \left[ \frac{\pi a}{\lambda} \left( \frac{x}{f'} - \sin \alpha \right) \right] \right\}^2 + \left( \frac{f'}{d} \right)^4 \left\{ b \operatorname{sinc} \left[ \frac{\pi b}{\lambda} \left( \frac{x}{d} - \frac{f'}{d} \sin \alpha \right) \right] \right\}^2 + \\ & + 2ab \left( \frac{f'}{d} \right)^2 \operatorname{sinc} \left[ \frac{\pi a}{\lambda} \left( \frac{x}{f'} - \sin \alpha \right) \right] \operatorname{sinc} \left[ \frac{\pi b}{\lambda} \left( \frac{x}{d} - \frac{f'}{d} \sin \alpha \right) \right] \times \\ & \times \cos \left\{ \frac{\pi x^2}{\lambda d} \left[ 1 - \frac{d}{f'} \left( 1 - \frac{L}{f'} \right) \right] + \frac{2\pi}{\lambda} \left[ v_1 \left( \frac{x}{f'} - \sin \alpha \right) - v_2 \left( \frac{x}{d} - \frac{f'}{d} \sin \alpha \right) \right] \right\} \end{aligned} \right].$$

На рис. 2 представлены результаты расчета распределения интенсивности света в плоскости регистрации при следующих значениях параметров разработанной математической модели:  $f' = 600$  мм;  $\alpha = 9^{\circ}23'$ ;  $a = b = 110$  мкм;  $L = 12$  мм;  $d = f'$ ;  $v_1 = 0$ ;  $v_2 = 1,7$  мм. Приведенные здесь же результаты экспериментальных исследований, представленные в виде фотоизображения дифракционной картины, хорошо согласуются с полученными ранее результатами теоретического анализа.

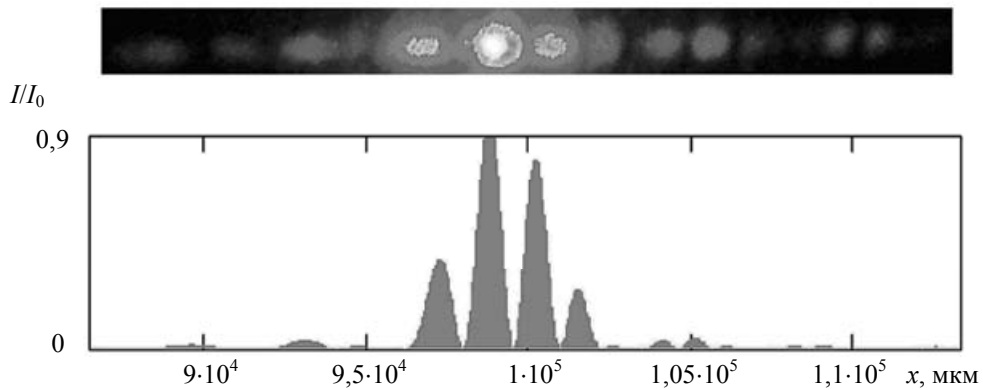


Рис. 2

В настоящее время достигнутое значение максимальной теоретической чувствительности рассмотренной системы к изменению угла  $\alpha$  падения излучения составляет 0,01 с.

В дальнейшем представляется целесообразным изучение разработанной математической модели схемы дифракционного контроля пространственного положения объектов, исследование зависимостей параметров дифракционной картины от смещения объектов и угла падения света на них, поиск областей наибольшей чувствительности к таким изменениям.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров В. Н., Линьков А. Е. Дифракционные методы контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптич. журн. 2002. Т. 69, № 2. С. 76—81.
2. Иваницкий Г. Р., Куниский А. С. Исследование микроструктуры объектов методами когерентной оптики. М.: Энергия, 1981.
3. Арефьев А. А., Старостенко Б. В. Определение показателя преломления оптически прозрачных сред дифракционным методом // Измерительная техника. 1986. № 5.
4. Иванов А. Н., Назаров В. Н. Использование муарового эффекта для создания высокоточных дифракционных схем контроля геометрических параметров объектов // Оптич. журн. 2010. Т. 77, № 4. С. 70—74.

5. Ivanov A. N., Nazarov V. N. Using the moiré effect to increase the accuracy of diffraction methods for monitoring the geometrical parameters and the spatial position of objects // J. of Optical Technology. 2009. Vol. 76, N 1. P. 39—42.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.
7. Тарлыков В. А. Лазерная дифрактометрия микрообъектов типовой формы: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб: СПбГУ ИТМО (ТУ), 2000.
8. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970.

#### Сведения об авторах

**Виктор Николаевич Назаров**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов;  
E-mail: naz\_1946@mail.ru

**Юрий Александрович Соколов**

— студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов;  
E-mail: sokolov-juri@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов

Поступила в редакцию  
26.04.11 г.

УДК 62.378

Г. В. ПОЛЬЩИКОВ, Е. И. ШЕВНИНА, ЛАМ ШОН ФАМ, Н. В. ШАЛЫГИНА

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЖИМА ТЕПЛООВОГО ХРАНЕНИЯ ТЕРМОУПРУГОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Проанализированы возможности использования в многоканальных фотометрических системах явления теплового хранения в приемниках излучения на основе термоупругого эффекта. Проведена оценка возможных источников погрешности измерения энергетических параметров лазерного излучения и рассмотрены методы их устранения.

**Ключевые слова:** термоупругий эффект, кристаллический кварц, тепловое поле.

Приемник излучения на основе термоупругого эффекта в кристаллическом кварце (ТУП), описанный, например, в работах [1—3], используется при измерении энергетических параметров лазерного излучения. Долговременная стабильность приемника и широкий рабочий спектральный интервал (от жесткого ультрафиолета до дальнего ИК-излучения) при большом динамическом диапазоне обуславливают его преимущества при решении ряда фотометрических задач. В частности, при решении таких задач, как измерение оптических характеристик материалов или распределение мощности и энергии излучения лазера по сечению осуществляется построение многоканальных измерительных приборов и систем. Зачастую, для исключения некоторых составляющих погрешностей измерительной системы, значения сигналов отдельных приемников определяются с помощью одного измерительного канала и одного аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В таких случаях приходится использовать систему схем выборки-хранения (СВХ) с последовательным опросом, преобразованием и обработкой сигнальных каналов. Система СВХ является аналоговой высокоимпедансной схемой, и ее использование существенно усложняет и удорожает измерительную



систему в целом. Приемник излучения типа ГУП в импульсном режиме работы обладает достаточно характерной реакцией на излучение лазера. Грамотное использование этих особенностей позволяет упростить систему в целом и уменьшить ошибки измерения.

Проанализируем некоторые особенности импульсной характеристики приемника на основе термоупругого эффекта. Анализ целесообразно проводить, представляя приемник излучения в виде полупространства, граница раздела которого характеризуется коэффициентом поглощения излучения  $\alpha_e$ , а материал этого полупространства — коэффициентом теплопроводности  $\lambda_T$ , коэффициентом температуропроводности  $a_T$ , теплоемкостью  $C_T$  и плотностью  $\rho$ .

Если импульсное излучение представить в виде прямоугольного импульса, то тепловое поле полуограниченного пространства, как показано в работах [1, 4] может быть выражено как

$$\vartheta(x, t) = \frac{2\alpha_e E_e \sqrt{t}}{\sqrt{\lambda_T C_T \rho}} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a_T t}}, \quad (1)$$

где  $\vartheta(x, t)$  — тепловое поле полупространства при равномерном освещении  $E_e$  границы раздела;  $x$  — координата, перпендикулярная этой границе; функция  $\operatorname{ierfc}Z$ , согласно [4], является дополнительным интегралом известной функции ошибок Гаусса  $\operatorname{erf}Z$  в пределах от 0 до  $Z$ .

Как показано в работах [1, 2], сигнал ГУП определяется энергией нестационарного температурного поля, запасенной в измерительной пластинке. Следовательно, ГУП представляет собой тепловой приемник излучения, оптимизированный по структуре и конструкции для работы в калориметрическом режиме с минимальной задержкой при формировании выходного сигнала. Это означает, что в течение определенного временного интервала установившееся значение выходного сигнала будет пропорционально интегралу от мощности воздействовавшего импульса излучения. С течением времени нестационарное тепловое поле приемника выходит за пределы измерительной пластинки, что приводит к уменьшению значения его сигнала.

Относительное значение энергии, вышедшей за пределы измерительной пластинки толщиной  $h$ , можно найти, если проинтегрировать выражение (1) в пределах от  $h$  до  $\infty$  и отнести ее к энергии импульса в целом. Согласно работе [3] получим следующее выражение:

$$\delta U_c = 4i^2 \operatorname{erfc} \frac{h}{2\sqrt{a_T t}}. \quad (2)$$

В практике теплофизических расчетов [4] используется понятие обобщенного времени или критерия Фурье

$$F_0 = \frac{a_T t}{x^2}.$$

Преобразуем выражение (2), используя значение критерия Фурье для задней поверхности измерительной пластинки. В результате получим зависимость ошибки интегрирования от обобщенного времени:

$$\delta U_c = 4i^2 \operatorname{erfc} \frac{\sqrt{F_0}}{2}. \quad (3)$$

Как правило, приходится решать обратную задачу — нахождение требуемой толщины измерительной пластинки для измерения энергии импульса определенной длительности при заданном значении допустимой ошибки измерения.

Если допустимую ошибку измерения задать равной, например, 0,01, то с помощью выражения (3) можно найти, используя, в частности, таблицы функций из работы [4], значение критерия Фурье для задней поверхности измерительной пластинки:  $F_0 = 0,25$ .

Материалом измерительной пластинки ТУП является кристаллический кварц X-среза, теплопроводность которого  $a_T = 4,8 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$ . Тогда толщина измерительной пластинки при условии допустимой ошибки 0,01 вычисляется как

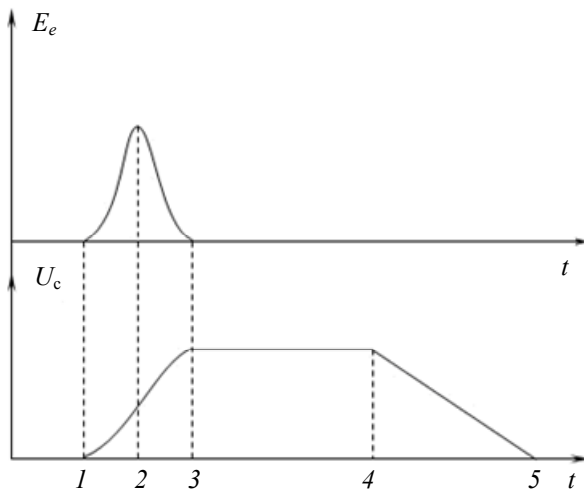
$$h = \sqrt{\frac{a_T t_{и}}{F_0}} = \sqrt{\frac{4,8 \cdot 10^{-2} t_{и}}{0,25}} = 0,438 \sqrt{t_{и}}, \quad (4)$$

где  $t_{и}$  — длительность импульса, с.

К примеру, при  $t_{и} = 10^{-4}$  с толщина кварцевой пластинки  $h = 0,0438$  мм. Из технологических соображений минимальную толщину кварцевой пластинки ограничивают значением 0,15 мм, что соответствует допустимой максимальной длительности интегрирования, равной, согласно выражению (4),  $t_{и \text{ max}} = 1,17 \cdot 10^{-3}$  с.

Если длительность импульса излучения меньше, чем время максимального интегрирования с заданной погрешностью, то разность между  $t_{и \text{ max}}$  и  $t_{и}$  можно толковать, как временной интервал теплового хранения.

На рисунке приведена временная зависимость реакции приемника излучения от воздействующего импульса. В момент времени  $1$  подается импульс лазерного излучения, и на площадке приемника создается освещенность  $E_e$ .



Действие этого импульса продолжается до момента времени 3. Моменту времени 2 соответствует максимум мощности излучения и максимум крутизны на кривой интегрирования энергии импульса излучения. На интервале от момента 3 и до момента 4 сохраняется постоянное напряжение на выходе приемника излучения, и этот временной интервал может быть использован для последовательного измерения амплитуды сигналов различных приемников в многоканальной фотометрической системе.

По окончании момента 4 начинается процесс затухания сигнала, когда энергия нестационарного теплового поля, накопленная в измерительной пластинке, уходит в демпфер. Согласно работе [3] этот процесс описывается выражением

$$U_c = k \alpha_e E_e \left[ t \left( 1 - 4i^2 \operatorname{erfc} \frac{h}{2\sqrt{a_T t}} \right) - H(t_{и} - t)(t - t_{и}) \left( 1 - 4i^2 \operatorname{erfc} \frac{h}{2\sqrt{a_T (t - t_{и})}} \right) \right], \quad (5)$$

где  $k$  — коэффициент термоупругого преобразования, для кристаллического кварца X-среза равный  $4,82 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{см}^2/\text{Дж}$ ;  $H(t_{и} - t)$  — функция Хависайда, равная 1 при  $(t_{и} - t) > 0$  и равная 0 при  $(t_{и} - t) \leq 0$ .

Особенности динамики затухания сигнала в данной статье не рассматриваются. Важно, что измерение амплитуды сигналов многоканальной системы должно быть закончено до начала процесса их затухания.

Большое значение временного интервала теплового хранения позволяет строить измерительную систему на АЦП среднего быстродействия, совмещенных с микроконтроллерами для предварительной обработки сигнала. В частном случае можно использовать предлагаемые фирмой “Analog Devices” (США) микроконверторы типа ADuC842B [5] с частотой преобразования до 400 кГц и с 12-битовым разрешением.

Выходной импеданс приемников излучения в основном формируется емкостью измерительной пластинки. При площади чувствительной площадки  $A$  ее емкость равна

$$C_{\text{пл}} = \frac{A\varepsilon\varepsilon_0}{h},$$

где  $\varepsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-14}$  Ф/см — диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\varepsilon = 4,5$  — относительная диэлектрическая проницаемость кварца.

При  $A=0,5 \times 0,5=0,25$  см<sup>2</sup> и  $h=0,15$  мм выходная емкость  $C_{\text{пл}} = 6,63$  пФ. При таких малых значениях емкости возникают проблемы, связанные с токами утечки и влиянием монтажных емкостей.

Влияние токов утечки можно компенсировать различными способами. В соответствии с тематикой данной статьи представляет интерес метод быстрых измерений, когда временной интервал между моментами возникновения сигнала и его измерения столь мал, что емкость не успевает разрядиться.

При использовании микроконвертора ADuC842B время одного измерения составляет 2,5 мкс, но число каналов может достигать 16 и более. При 16 каналах цикл измерений составит 40 мкс, в связи с чем потребуется оценить влияние токов утечки, используя понятие сопротивления утечки. В качестве математической модели процесса разряда целесообразно использовать экспоненциальное представление разряда емкости. Если допустимую ошибку разряда приравнять к ошибке интегрирования, то соотношение между постоянной времени контура цепи приемника излучения и временем измерения сигнала будет стремиться к 100. Следовательно, постоянная времени должна быть на уровне 4 мс. При  $C_{\text{пл}} = 6,6$  пФ требуемое значение сопротивления нагрузки с учетом паразитных цепей должно быть равным  $0,5 \cdot 10^9$  Ом. Эта задача выполнима, но обеспечить долговременную стабильность, особенно при многоканальном согласующем усилителе, сложно.

Дополнительные проблемы обеспечения стабильности работы приемника связаны с монтажными емкостями реальной конструкции и входными емкостями согласующего усилителя. Монтажная емкость является шунтирующей по отношению к емкости измерительной пластинки, так же как и входная емкость согласующего усилителя. В результате их влияния значение воспринимаемого сигнала уменьшается. Диапазон изменения этих емкостей составляет 5—7 пФ, что может привести к почти 100 %-ному изменению чувствительности приемника.

С другой стороны, в лазерной фотометрии, как правило, не возникает проблем с обеспечением необходимого значения соотношения сигнал/шум. Это позволяет повысить стабильность входных цепей за счет емкостного шунтирования приемника. В этом случае чувствительность приемника согласно [3] определяется как

$$S = \alpha_e k \frac{C_{\text{пл}} + C_{\text{ш}}}{C_{\text{пл}}},$$

где  $C_{\text{ш}}$  — емкость шунтирующего конденсатора.

При достаточном уровне сигнала уменьшение чувствительности в 1000 раз обуславливает возможность построения измерительной системы с входным сопротивлением 0,5 мОм, что гарантирует долговременную стабильность измерительного устройства.

Даже при использовании прецизионных конденсаторов необходимо учитывать технологический разброс реальных значений их емкостей. При использовании в качестве АЦП микроконверторов со встроенным вычислительным ядром (например, ADuC842B) реальный разброс чувствительности многоэлементного приемника излучения может быть скомпенсирован на этапе предварительной обработки сигнала.

Таким образом, при использовании приемника излучения на основе термоупругого эффекта в кристаллическом кварце возможно построение многоканальных измерительных систем с внутренним тепловым хранением результатов измерения для реализации последовательного считывания сигналов. Дополнительным преимуществом таких систем является разнесение во времени процесса измерения параметров лазерного импульса, который

сопровождается интенсивными электромагнитными помехами, и процесса считывания и преобразования сигнала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ишанин Г. Г., Панков Э. Д., Челибанов В. П. Приемники излучения: Учеб. пособие для вузов. СПб: Папирус, 2003. 527 с.
2. Ишанин Г. Г., Польщиков Г. В. Измерительный приемник излучения на термоупругом эффекте в кварце // ПТЭ. 1973. № 5. С 206—208.
3. Польщиков Г. В. Методика учета систематической погрешности термоупругого преобразования измерительного приемника излучения // Метрология. 1981. № 6. С. 46—51.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высш. школа, 1967. 592 с.
5. Электронный ресурс: <<http://www.analog.com/en/analog-microcontrollers/analog-microcontrollers/aduc842/products/product.html>>.

#### Сведения об авторах

- Георгий Владимирович Польщиков** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: polschikov@list.ru
- Елена Ивановна Шевнина** — ООО „СокТрейд“, Санкт-Петербург; ведущий инженер; E-mail: eshevnina@soctrade.ru
- Лам Шон Фам** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: psonlamvn@yahoo.com
- Наталья Владимировна Шалыгина** — соискатель; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: SHAL1976@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию  
26.04.11 г.

УДК 535.243

В. В. РОЖЕНЦОВ, Р. К. МАМЕДОВ

### ГОНИОСПЕКТРОРАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОКАЛЬНЫХ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ

Представлен метод определения пространственных спектральных характеристик локальных световых полей. Приведена схема экспериментальной измерительной установки. Обосновывается применение данного метода для решения задач авиационного приборостроения.

**Ключевые слова:** пространственные спектральные измерения, локальные световые поля, спектрофотометрия.

Качество и эффективность функционирования оптических и оптоэлектронных приборов и систем, формирующих и отображающих визуальную информацию не только в плоскости, но и в пространстве, могут быть достигнуты лишь при условии обеспечения высокого качества

пространственного оптического изображения и реализации улучшенных спектральных характеристик световых полей [1—3]. К таковым относятся устройства, использующие RGB-источники излучения; приборы и системы, использующие жидкокристаллические матрицы, интерференционные и поляризационные покрытия, анизотропные материалы, а также приборы и системы, изначально формирующие объемное изображение. Оптические характеристики таких приборов и систем могут зависеть от угла обзора, т.е. от их пространственного положения относительно наблюдателя. Особую актуальность информация о пространственных спектральных характеристиках световых полей обретает в тех случаях, когда наблюдения осуществляются в условиях темновой и цветовой адаптации глаза человека, а также посредством специальных оптических систем (например, систем ночного видения) [4, 5].

В настоящей статье предложен метод решения задачи определения пространственных спектральных характеристик локальных световых полей, основанный на сочетании спектро-радиометрического и гониофотометрического методов измерений и условно названный „гониоспектрорадиометрическим методом“. Данный метод реализуется посредством пошаговых измерений спектральных плотностей энергетических фотометрических величин объекта измерения при его повороте на заданные углы. Получаемая таким образом информация позволяет осуществить расчет пространственного распределения таких оптических характеристик, как световая яркость, световая освещенность, сила света, координаты цветности в системе любого цветового пространства, а также определить редуцированные фотометрические величины, например энергетическую яркость, воспринимаемую приборами ночного видения, — ПНВ-яркость [4, 6].

Для экспериментальной апробации предлагаемого метода разработана гониоспектрорадиометрическая установка, функциональная схема которой приведена на рис. 1.

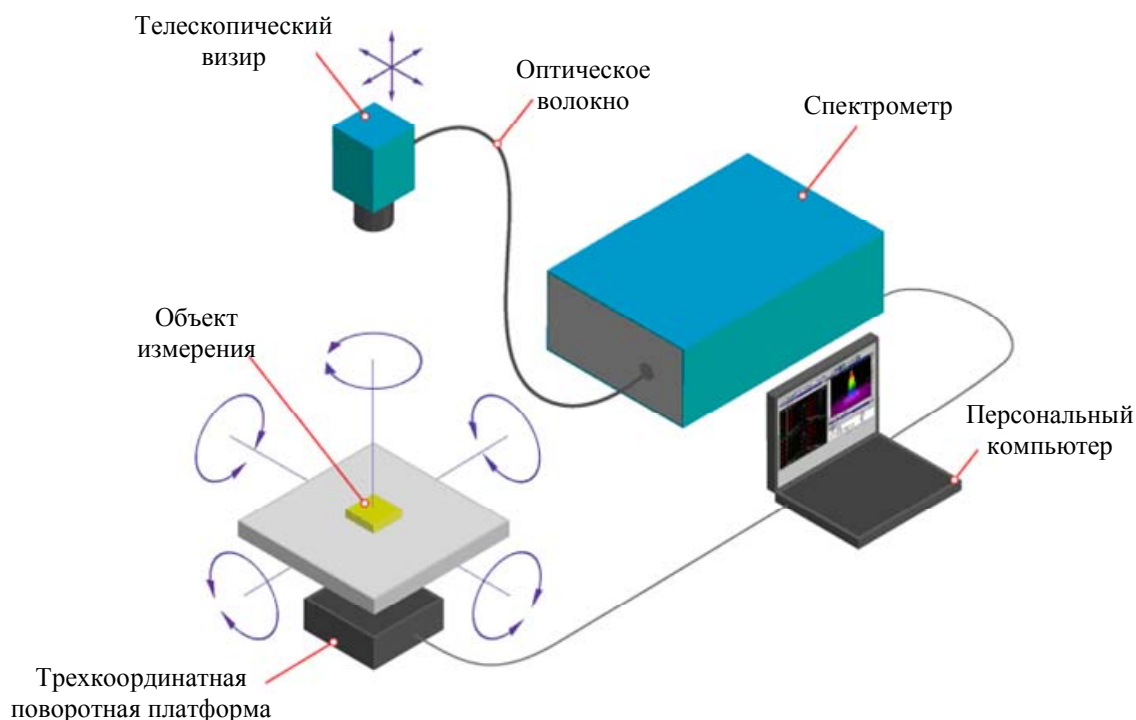


Рис. 1

В состав установки входит трехкоординатная поворотная платформа, на которой размещается объект измерений. Положение вращающейся части платформы контролируется датчиком угла поворота, который соединен с контроллером, управляющим перемещением платформы. В качестве средства измерения был использован спектро-радиометр, содержащий телескопический визир и спектрометр. Оптический сигнал, поступающий с телескопического

визира, передается в спектрометр посредством оптического волокна. Монохроматор спектрометра выполнен по схеме Черни — Тернера. Оптическая схема установки представлена на рис. 2.

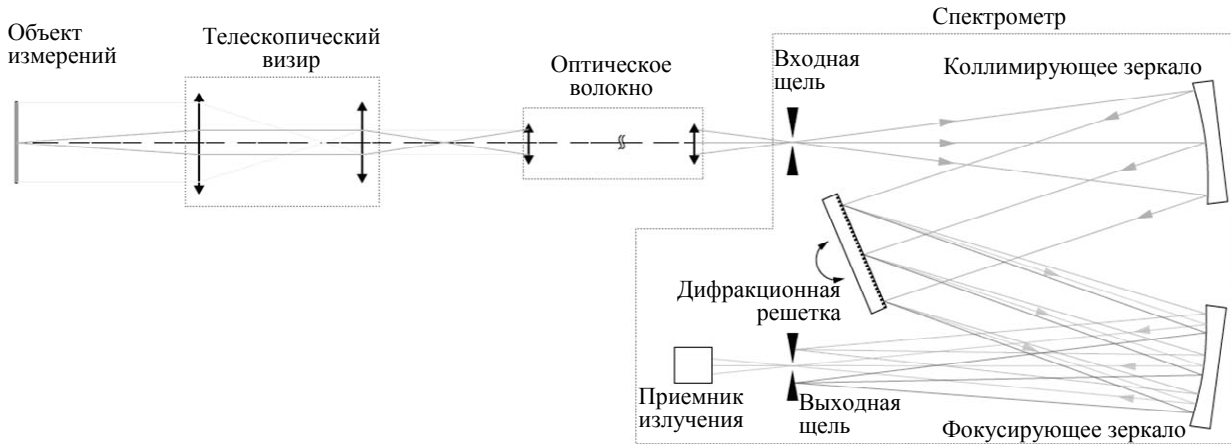


Рис. 2

Преимуществами выбранной оптической схемы спектрометра являются малые aberrации и достаточно большая светосила. В процессе измерений спектрометр регистрирует спектр излучения объекта для каждого дискретного положения платформы. Информация о спектре излучения объекта измерений и значении угла поворота платформы поступает на компьютер. На основе полученной информации осуществляется расчет спектральных световых фотометрических величин по следующим формулам [6]:

$$L_v(\varphi, \theta, \lambda) = 638 \cdot \int_{380}^{780} K(\lambda)N(\lambda)d\lambda,$$

где  $L_v$  — световая яркость;  $K(\lambda)$  — нормированная спектральная кривая чувствительности глаза;  $N(\lambda)$  — спектральная плотность энергетической яркости объекта измерений;  $\varphi, \theta$  — углы наклона между нормалью и лучом в азимутальной и сагиттальной плоскостях соответственно;

$$E_v(\varphi, \theta, \lambda) = 638 \cdot \int_{380}^{780} K(\lambda)E_e(\lambda)d\lambda,$$

где  $E_v$  — световая освещенность;  $E_e(\lambda)$  — спектральная плотность энергетической освещенности объекта измерений;

$$X = \int_{380}^{780} \bar{x}N(\lambda)d\lambda, \quad Y = \int_{380}^{780} \bar{y}N(\lambda)d\lambda, \quad Z = \int_{380}^{780} \bar{z}N(\lambda)d\lambda;$$

$$u' = \frac{4X}{X+15Y+3Z}; \quad v' = \frac{9Y}{X+15Y+3Z},$$

где  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  — спектральные чувствительности глаза (функции сложения цветов) согласно документации Международного комитета по освещению (МКО) 1931 г.;  $X, Y, Z$  — координаты цвета в системе МКО;  $u'$  и  $v'$  — координаты цветности в системе МКО 1976.

ПНВ-яркость ( $R_A$ ) при указанной световой яркости  $L_v$  равна

$$R_A = \frac{L_r}{L_m} \int_{380}^{930} G_A(\lambda)N(\lambda)d\lambda,$$

где  $L_r$  — необходимый уровень световой яркости для  $R_A$ ;  $L_m$  — спектрально усредненная световая яркость;  $G_A(\lambda)$  — относительная спектральная чувствительность ПНВ класса А.



Вычисление световых спектральных фотометрических величин производится автоматически с использованием программного обеспечения спектрорадиометра.

По результатам измерений  $I_e(\lambda)$ ,  $N(\lambda)$  и  $E_e(\lambda)$  RGB-источника излучения были рассчитаны пространственные (угловые) распределения силы света в системе сферических координат (рис. 3), координаты цветности в системе МКО 1976, а также пространственные распределения спектральной плотности силы света для спектрального диапазона 620—650 нм (рис. 4). Результаты измерений позволили оценить абсолютные значения различных фотометрических характеристик объекта, получить информацию о форме их распределения, произвести оценку совместимости работы объекта измерений и ПНВ 3-го поколения класса А [6], выявить зависимость спектральных распределений фотометрических величин излучения от угла обзора. В частности, детальный анализ результатов измерений (см. рис. 4) показал, что при изменении угла обзора сила света уменьшилась на 70 %, а спектр излучения RGB-источника сместился на величину  $\Delta\lambda=5$  нм в коротковолновую область спектра. Изменение спектра, в свою очередь, привело к изменению координат цветности. Зависимость изменения цветности RGB-источника излучения от угла обзора показана на рис. 3.

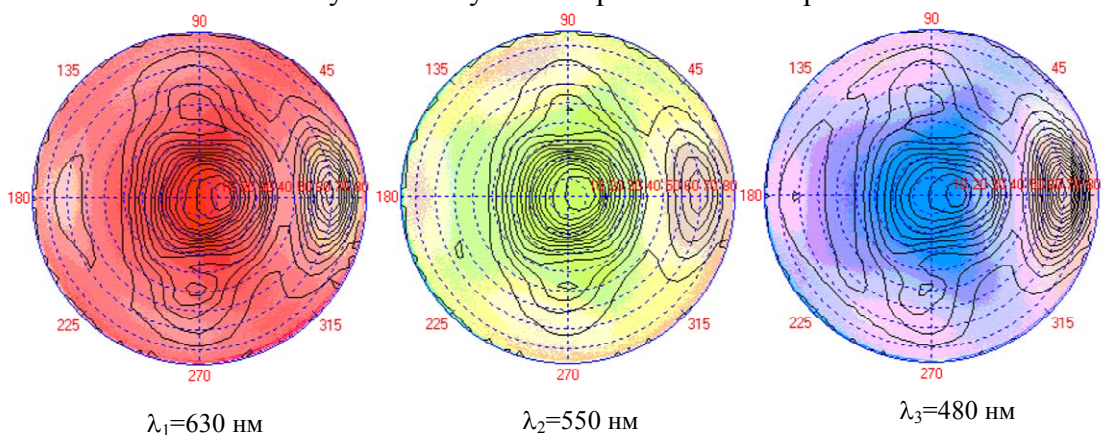


Рис. 3

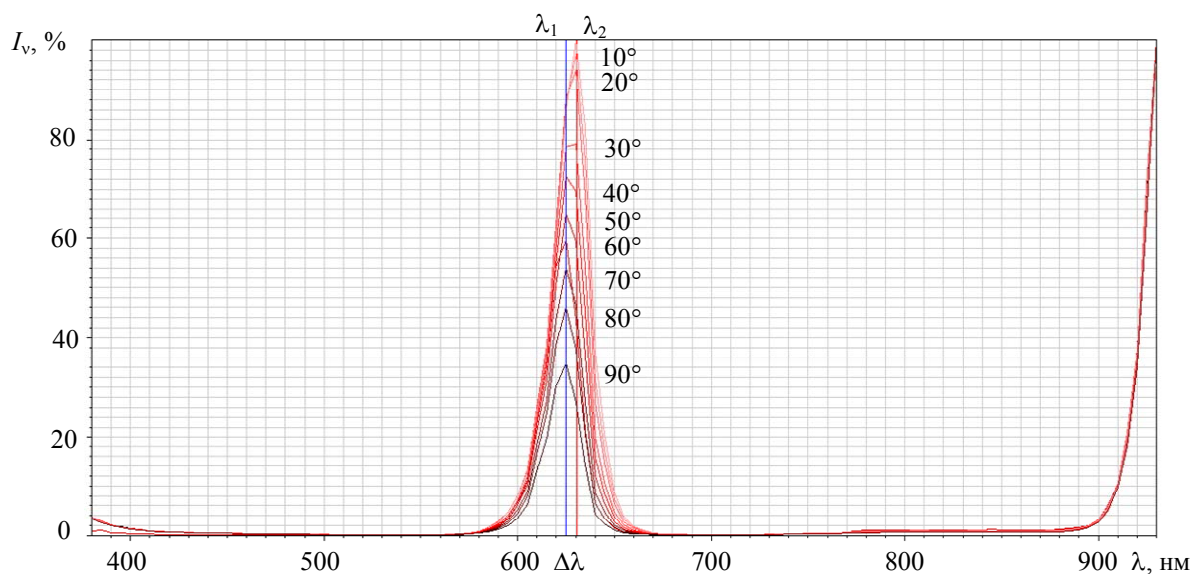


Рис. 4

Таким образом, основываясь на результатах экспериментальных исследований, можно утверждать, что использование предложенного метода позволяет на практике решить задачу определения пространственных спектральных характеристик локальных световых полей, способствует улучшению качества создаваемых систем отображения визуальной информации и обеспечивает возможность ее более эффективной эксплуатации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Роженцов В. В., Мамедов Р. К.* Проблемы и перспективы пространственных спектральных измерений локальных световых полей // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Сер. Наука и образование. 2011. Вып. 1(117). С. 170—176.
2. *Бахарев Д. В.* О структуре световых полей // Светотехника. 2005. № 3. С. 40—44.
3. *Бахарев Д. В.* Геометрия размытого оптического изображения // Там же. 1993. № 8. С. 10—13.
4. Night Vision Imaging System Lighting Compatibility Assessment Methodology / *H. Lee Task, A. R. Pinkus, M. H. Barbato, M. A. Hausmann* // Air Force Research Laboratory, USA. 2004.
5. *Lloyd G. F. H.* Cockpit Lighting Standards and Techniques for Use with Night Vision Goggle // Working Paper 6. Iss B. Royal Aircraft Establishment, FS(F), 1986.
6. MIL-STD-3009. Lighting, Aircraft, Night Vision Imaging System (NVIS) Compatible. Department of Defense Interface Standard, 2001.

**Сведения об авторах**

- Вадим Вячеславович Роженцов** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов;  
E-mail: Vadim.Rozhentsov@transas.com
- Роман Камильевич Мамедов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов;  
E-mail: Romamedov@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов

Поступила в редакцию  
26.04.11 г.



О. А. АБАКШИНА, Г. В. ЕГОРОВ, С. М. ЛАТЫЕВ, С. С. МИТРОФАНОВ

## МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИНДИКАТОРОВ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Рассматриваются результаты модернизации конструкций фотоэлектрических индикаторов линейного перемещения. Представлена схема устройства для контроля радиусов кривизны сферических поверхностей с использованием индикатора.

*Ключевые слова:* фотоэлектрические индикаторы, линейные измерения.

Конструкции типовых фотоэлектрических индикаторов, предназначенных для измерения линейных размеров, достаточно разнообразны. Среди них различают:

— бесконтактные фотоэлектрические индикаторы, принцип действия которых основан на измерении расстояний с помощью лазерных диодов [1]; бесконтактные индикаторы, иначе называемые датчиками положений или расстояний (выпускаемые фирмами “Turck”, “Ervin”, SICK, “Pepperl+Fuchs”, “Omron”), используются в основном для обнаружения объектов и реже — для измерения расстояний, при этом погрешность измерения достигает больших значений;

— контактные индикаторы, в которых используется растровое сопряжение линейных шкал [2, 3]; контактные индикаторы выпускаются разными компаниями.

В настоящей статье будем рассматривать отечественные, изготавливаемые СКБ ИС (Санкт-Петербург), контактные индикаторы как наиболее широко применяемые. СКБ ИС выпускает ряд фотоэлектрических преобразователей линейных перемещений со штоком: ЛИР-14, ЛИР-15, ЛИР-17, ЛИР-19. В настоящее время разработан и готовится к выпуску преобразователь линейного перемещения со штоком и жидкокристаллическим индикатором ЛИР-17И, который более всего соответствует понятию „фотоэлектрический индикатор линейного перемещения“.

Рассмотрим индикатор ЛИР-17И в качестве примера. Принцип его функционирования поясняется схемой, приведенной на рис. 1: линейное перемещение штока 5 преобразуется с помощью измерительного 1 и индикаторного 3 оптических растров в изменение интенсивности светового потока, падающего на фотоприемники 4, которые вырабатывают пропорциональные аналоговые электрические сигналы  $U_1$  и  $U_2$ . В результате усиления и обработки этих сигналов с использованием преобразователей 6, 7 и устройств 8, 9 формируются счетные электрические импульсы.

Функция, связывающая перемещение штока с числом  $n$  счетных импульсов, имеет вид

$$Y = \frac{kT}{4} n = An,$$

где  $T$  — период деления растров,  $k$  — коэффициент деления интерполятора,  $A$  — цена счетного импульса в линейной мере.

Недостатками данного индикатора являются относительная сложность конструкции, необходимость юстировки преобразователя, а также малое расстояние между измерительным и индикаторным растрами (10—80 мкм).

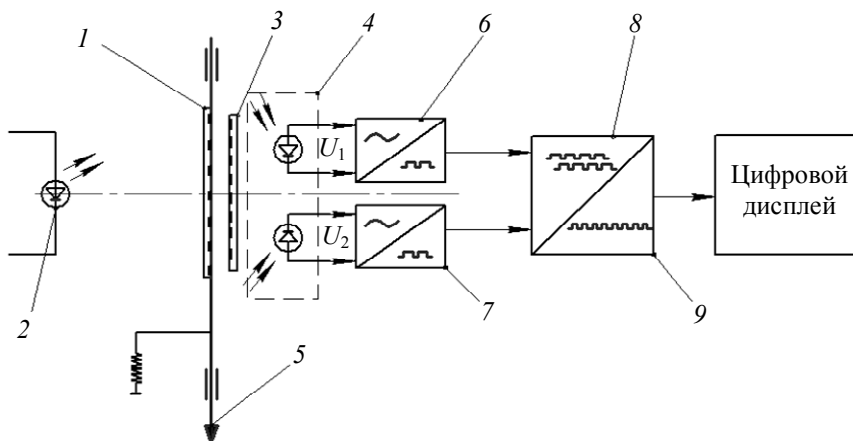


Рис. 1

Одно из возможных решений по упрощению конструкции индикатора — использование в качестве приемников излучения позиционно-чувствительных фотоприемников, таких как ПЗС-линейка, фотоприемник „мультискан“ [2], фотоприемник PSD фирмы „Hamamatsu“ (Япония).

При разработке авторами настоящей статьи конструкции фотоэлектрического индикатора был сделан выбор в пользу фотоприемника „мультискан“, так как при его использовании упрощается не только конструкция индикатора, но и последующая обработка электрического аналогового сигнала.

Функциональная схема индикатора на базе позиционно-чувствительного приемника „мультискан“ представлена на рис. 2.

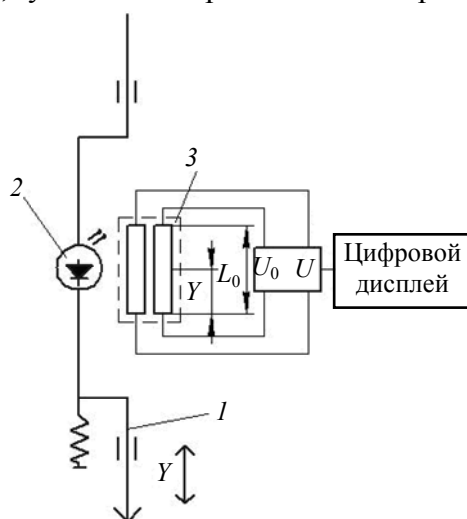


Рис. 2

При перемещении измерительного штока 1 происходит смещение центра светового пятна, создаваемого светодиодом 2, на светочувствительной площадке „мультискана“ 3, с которого снимается аналоговый электрический сигнал  $U$ .

Искомое перемещение  $Y$  определяется как

$$Y = \frac{L_0}{U_0} U,$$

где  $L_0$  — длина светочувствительной площадки „мультискана“,  $U_0$  — опорное напряжение, подаваемое на „мультискан“,  $U$  — измеряемое напряжение.

На основе предложенной схемы (см. рис. 2) был спроектирован и изготовлен макет индикатора. Для нахождения его точностных характеристик методом сравнения с образцовыми концевыми мерами длины ( $L_{i\text{ср}}$ )

класса точности 1 согласно ГОСТ 9083-73 определялось предельное значение погрешности измерений. Результаты измерений приведены на рис. 3: видно, что изменение погрешности составило величину  $\Delta Y = 0,02$  мм, а СКО  $\sigma = 0,007$  мм. Была измерена также нелинейность работы индикатора, график которой приведен на рис. 4.

Разработанный индикатор может быть применен в устройстве для контроля радиусов сферических поверхностей оптических деталей. Функциональная схема такого устройства представлена на рис. 5, где 1 — измерительный штوك, 2 — источник излучения, 3 — позиционно-чувствительный приемник „мультискан“, 4 — оптическая деталь; 5 — сферическая опора.

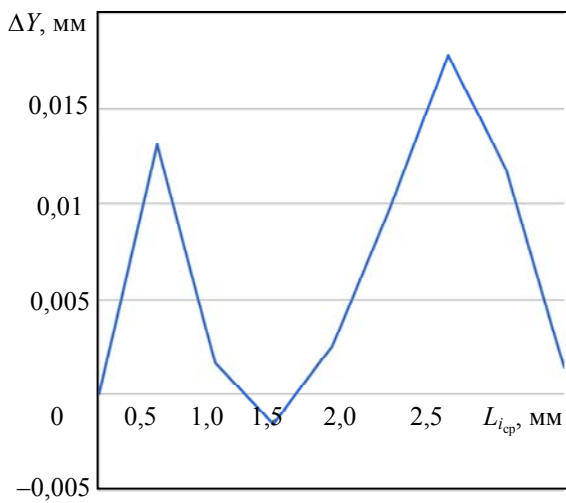


Рис. 3

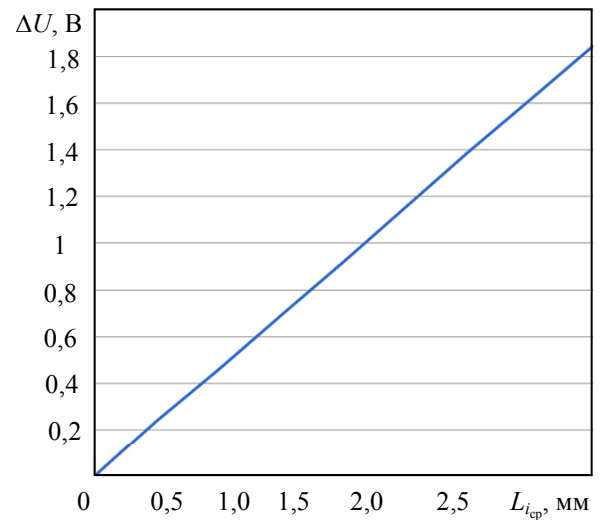


Рис. 4

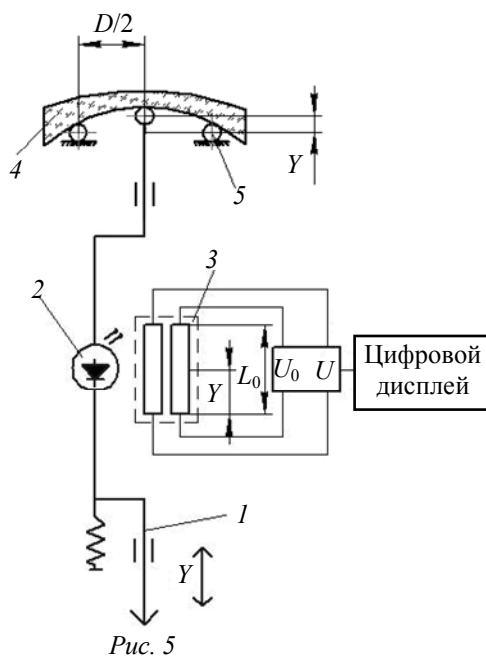


Рис. 5

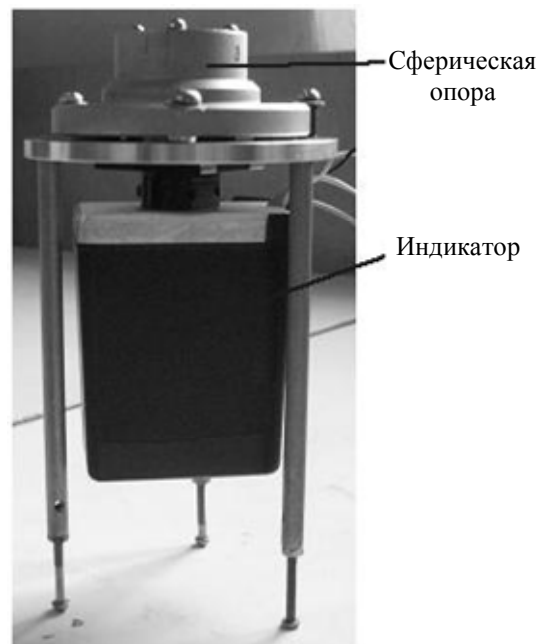


Рис. 6

Радиус сферической поверхности вычисляется следующим образом:

$$R = \frac{D^2}{8y} + \frac{y}{2} \pm r = \frac{D^2}{8nA} + \frac{nA}{2} \pm r,$$

где  $D$  — диаметр опорного кольца,  $r$  — радиус сферической опоры-шара (для вогнутой поверхности знак „плюс“, для выпуклой — „минус“),  $y$  — стрелка прогиба линзы.

Внешний вид сферометра на основе „мультискана“ приведен на рис. 6.

Индикаторы на базе приемника „мультискан“ могут быть использованы также для контроля линейных размеров с возможностью алгоритмической коррекции погрешностей и с точностью не ниже имеющихся аналогов.

Подобный сферометр может быть изготовлен и на основе индикатора ЛИР-15. Функциональная схема такого сферометра аналогична приведенной на рис. 5. Однако в этом

случае стоимость сферометра будет существенно выше вследствие более сложной конструкции индикатора ЛИР-15 (схема которого аналогична схеме индикатора ЛИР-17И, рис. 1).

Оба сферометра — и на основе „мультискана“, и на основе ЛИР-15 — имеют ряд погрешностей, влияющих на точность измерений: погрешность измерения диаметра опорного кольца ( $\Delta D$ ); погрешность измерения радиуса сферических опор ( $\Delta r$ ); контактная деформация линзы и опор, обусловленная весом линзы ( $\Delta P_{л}$ ); контактная деформация линзы и сферического наконечника штока под действием мерительного усилия ( $\Delta P_{ш}$ ); погрешность измерения стрелки прогиба ( $\Delta y$ ); влияние отклонение температуры окружающей среды от номинального значения ( $\Delta T$ ). Сферометру на основе ЛИР-15 присуща, кроме того, погрешность измерения радиуса, возникающая из-за смещения штока относительно центра опорного кольца (несоосность —  $\Delta e$ ).

Перечисленные погрешности оказывают существенное влияние на точность контроля радиусов сферических поверхностей, но могут быть скомпенсированы алгоритмически [4].

Расчет погрешностей производился при следующих параметрах сферометра на основе ЛИР-15: диаметр опорного кольца 30 мм, радиус наконечника штока 2,5 мм, максимальная допустимая погрешность 1,025 мкм, радиус шаровых опор 2,306 мм, несоосность 5 мкм.

Предварительная оценка погрешностей представлена ниже.

$\Delta D$ , мкм.....	0,9
$\Delta r$ , мкм.....	0,2
$\Delta y$ , мкм.....	0,22
$\Delta P_{л}$ , мкм.....	$1,44 \cdot 10^{-4}$
$\Delta P_{ш}$ , мкм.....	$1,44 \cdot 10^{-4}$
$\Delta T$ , мкм.....	$5,69 \cdot 10^{-2}$
$\Delta e$ , мкм.....	$1,34 \cdot 10^{-4}$
$\Delta Y_{\Sigma}$ , мкм.....	0,95

Как показал предварительный анализ, сферометр на основе ЛИР-15 может работать с точностью не ниже точности известных аналогичных сферометров, стоимость которых существенно выше.

На макете сферометра, собранном на основе индикатора ЛИР-15, были произведены измерения радиусов поверхностей образцовой выпуклой линзы:  $R_{\text{вып}} = 80,17$  мм, СКО которой  $\sigma = 0,0013$  мм, и образцовой вогнутой линзы:  $R_{\text{вог}} = 131,83$  мм, для которой  $\sigma = 0,0007$  мм.

Исследования разработанных устройств на основе „мультискана“ и индикатора ЛИР-15 подтвердили их работоспособность и высокие технические характеристики при минимальных материальных затратах. Эти устройства целесообразно использовать в качестве сферометров для контроля радиусов деталей оптических приборов и радиусов сферических поверхностей деталей газодинамических опор гироскопических приборов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысенко О. Фотоэлектрические датчики компании SICK AG //Электронные компоненты. 2005. № 5, 6.
2. ЗАО „ТЕХНОЭКСАН“. Каталог продукции (позиционно-чувствительный приемник „Мультискан“) [Электронный ресурс]: <[www.technoexan.ru](http://www.technoexan.ru)>.
3. Датчики перемещения СКБ ИС — ЛИР-14 (Инкрементный преобразователь линейных перемещений) [Электронный ресурс]: <[www.skbis.ru](http://www.skbis.ru)>.
4. Латыев С. М. Конструирование точных (оптических) приборов: Учеб. пособие. СПб: Политехника, 2007. С. 295—300, 312—316.

#### Сведения об авторах

**Ольга Алексеевна Абакишина**

— аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

- Геннадий Васильевич Егоров** — доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов
- Святослав Михайлович Латыев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; зав. кафедрой; E-mail: smlatyev@yandex.ru
- Сергей Сергеевич Митрофанов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: m1990s@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов

Поступила в редакцию  
26.04.11 г.

УДК 531.7.082.5:535.42

В. Н. НАЗАРОВ, А. Н. ИВАНОВ

## ФОРМИРОВАНИЕ МУАР-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ ПРИ ДИФРАКЦИИ НА ЩЕЛИ МЕЖДУ КРАЕМ С КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНОЙ И ЗЕРКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Рассматривается модель формирования муар-интерференционных полос при дифракции излучения на щели, образованной между краем объекта, имеющим конечную толщину, и плоской отражающей поверхностью. Выведена зависимость, связывающая толщину края и форму полос.

**Ключевые слова:** дифракция, муар, измерения.

**Введение.** Совершенствование методов дифракционного контроля в целях увеличения их точности и чувствительности возможно, как показано в работах [1—3], при использовании особого распределения фазы входного сигнала на поверхности контролируемого объекта. Один из способов формирования необходимого распределения фазового сигнала — освещение объекта двумя волновыми фронтами, распространяющимися под углом  $2\theta$ , где  $\theta$  — угол падения волны на объект [1, 2]. Тогда, в соответствии с теоремой трансляции для преобразования Фурье, изменение формы объекта приведет к появлению разности фаз частотных спектров, формирующихся при дифракции света:

$$\Phi = 2k \Delta |\theta|, \quad (1)$$

где  $k$  — волновое число,  $\Delta$  — смещение оси симметрии объекта.

В случае когда  $\Delta = f(y)$ , т.е. когда ось симметрии объекта смещается в соответствии с каким-либо законом, разность фаз  $\Phi$  изменяется пропорционально смещению  $\Delta$ . Наложение частотных спектров с разными значениями фазы приводит к появлению муар-интерференционных полос.

Для проверки данного положения были исследованы дифракционные картины на щели между краем объекта, имеющим малую толщину, и плоской отражающей поверхностью. Благодаря делению волнового фронта на зеркале формируются два волновых фронта, распространяющиеся под углом  $2\theta$ . В ходе расчетов было получено выражение, описывающее распределение амплитуды на щели в дальней области:

$$U(\omega_x, y') = A \operatorname{sinc}(k \omega_x a(y)/2) \cos((k \omega_x a(y) + k \Delta a(y) \theta)/2), \quad (2)$$

где  $\omega_x = x'/z$  — пространственная частота;  $a(y) = a_0 + \Delta a(y)$  — функция, описывающая изменение ширины щели ( $a$ ) между зеркалом и краем объекта;  $A = a(y)/\sqrt{z\lambda}$ ,  $y = y'$ .

Численное моделирование в соответствии с выражением (2) показало, что при  $\Delta a(y) = \alpha y$ , где  $\alpha$  — угол наклон края относительно поверхности зеркала, возникает муар-интерференционная картина полос равной ширины. Эти результаты были подтверждены экспериментально.

**Расчет муар-интерференционной картины.** С позиции практического применения метода дифракционного контроля целесообразно рассмотреть формирование муар-интерференционной картины на щели, образованной краем объекта, имеющим определенную толщину.

В качестве примера рассмотрим обладающий абсолютно поглощающей нижней гранью объект с прямоугольным краем (рис. 1). В этом случае муар образуется наложением частотных спектров, сформированных при дифракции света на кромках  $A$  и  $B$ . Так как прямая и отраженная волны падают на кромки объекта с разными по знаку углами, то при смещении кромок между их частотными спектрами появляется фазовый сдвиг, пропорциональный величине смещения:

$$\Phi = k \theta \Delta a / 2 + k \theta \Delta b / 2, \quad (3)$$

где  $\Delta a$  и  $\Delta b$  — смещения кромок  $A$  и  $B$ .

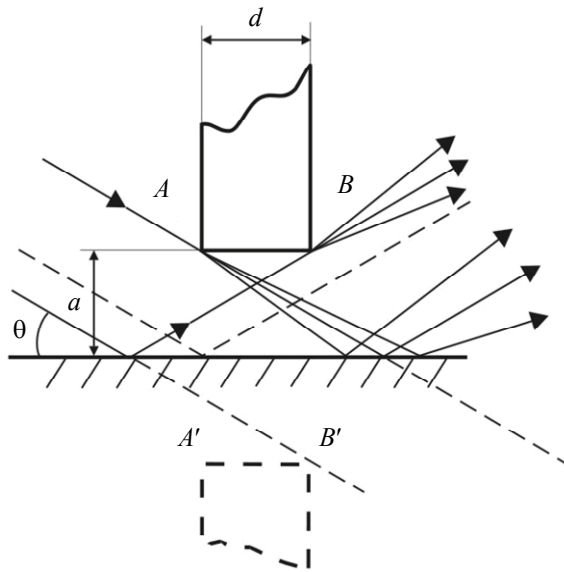


Рис. 1

Если объект наклонить относительно поверхности зеркала, то вдоль щели возникнет градиент фазы, и в дифракционной картине появится дополнительная система муаровых полос равной ширины.

Схему, приведенную на рис. 1, можно представить как объект типа бипланарная щель [4, 5], образованную кромкой  $A$  и изображением кромки  $B$  в зеркале ( $B'$ ). Ширина волнового фронта, проходящего через такую щель, зависит от расстояния  $d$  и определяется выражением  $W = a + b'$ ,  $b' = b - d \theta$ , где  $a$  и  $b$  — расстояния между кромками и зеркалом. Отраженный волновой фронт не будет проходить через щель, если выполняется условие  $b = d \theta$ . С учетом вышеизложенного распределение амплитуды в дальней области характеризуется выражением

$$U(\omega_x, y) = (\exp(ikz)/ik\lambda) \left( C_1 \int_{-a(y)}^0 \exp(ik(\omega_x + \theta)) dx + C_2 \int_0^{b'(y)} \exp(ik(\omega_x - \theta)) dx \right), \quad (4)$$

$$C_1 = \exp(-ik \Delta a(y)(\omega_x + \theta)/2) \exp(-ik d (\omega_x + \theta)^2 / 2),$$

$$C_2 = \exp(-ik \Delta a(y)(\omega_x - \theta)/2).$$

Полагая  $\Delta a = \Delta b$  и пренебрегая виньетированием части волнового фронта, так как это приводит лишь к изменению начального значения разности фаз, упрощаем выражение (4):

$$U(\omega_x, y') \approx A \operatorname{sinc}(k \omega_x a(y)/2) \cos((k \omega_x a(y) + k \Delta a(y) \theta)/2 - k \omega_x^2 d \theta / 4). \quad (5)$$

Численное моделирование в соответствии с выражениями (4) и (5) показало, что если  $\Delta a(y) = \alpha y$ , то ширина муаровых полос не меняется и составляет  $S = \lambda / \alpha \theta$ , но полосы искривляются. Это обусловлено продольным смещением кромок  $A$  и  $B$ , приводящим к появлению разности фаз частотных спектров:  $\Phi_d = k d \omega_x^2 / 2$ .

На рис. 2 представлена полученная в результате компьютерного моделирования муар-интерференционная картина на щели, образованной краем толщиной 1,2 мм.



Рис. 2

Рассматривая функции  $\operatorname{sinc}(\cdot)$  и  $\cos(\cdot)$  выражения (5) как пространственные амплитудно-фазовые решетки, можно получить параметрическое уравнение муаровых полос

$$p = (2 \Delta a(y) \theta - \omega_x^2 d - \lambda) / 2 \lambda, \quad (6)$$

где  $p$  — порядок полосы; в случае наклона на угол  $\alpha$  выражение (6) принимает вид  $y = (x^2 d / z^2 + \lambda(2p + 1)) / 2 \alpha \theta$ .

**Экспериментальное исследование.** Для экспериментальной оценки предложенного метода был собран макет установки. В качестве контролируемого объекта использовался калиброванный цилиндр диаметром 13 мм с неотражающей поверхностью, изготовленный с допуском h9. Согласно методу эквивалентных диафрагм [4, 5] цилиндр можно заменить двумя полуплоскостями, смещенными относительно друг друга на расстояние  $d = D \theta$ , где  $D$  — диаметр цилиндра. Поэтому, оценив по муаровым полосам величину  $d$ , можно определить диаметр цилиндра  $D$ . Для оценки параметра  $d$  была создана цифровая методика обработки полос, позволяющая найти величину  $d$  по разности координат трех точек минимумов муаровой полосы:

$$d = (\Delta y_1 - \Delta y_2) \alpha \theta z^2 / (\Delta x_1 \Delta x_2),$$

где  $\Delta x_1, \Delta y_1$  — разности координат первой пары точек,  $\Delta x_2, \Delta y_2$  — разности координат второй пары точек.

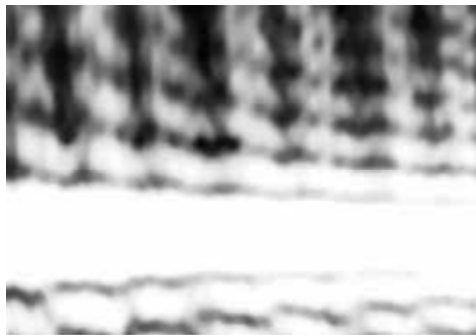


Рис. 3

Подробное описание алгоритма обработки муар-интерференционной картины и схема макета установки приведены в работе [6].

Экспериментально полученная муар-интерференционная картина изображена на рис. 3. Ее сравнение с численной моделью (см. рис. 2) показало хорошее качественное соответствие. Погрешность определения диаметра цилиндра по координатам муаровых полос составила порядка 3 %.

**Заключение.** Предложенный метод дифракционного контроля основан на использовании фазовой составляющей сигнала. Получено хорошее соответствие результатов численного моделирования и эксперимента. Исследована зависимость муаровых полос от толщины краев

объекта и выведено соответствующее выражение. Показано, что данный метод может быть использован для контроля геометрических параметров цилиндров большого диаметра.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Санкт-Петербурга, грант № 28-04/18.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров В. Н., Иванов А. Н. Использование явления муара для увеличения точности дифракционных методов контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптич. журн. 2009. Т. 76, № 1. С. 46—50.
2. Назаров В. Н., Иванов А. Н. Дифракционный метод контроля на основе „зеркальной“ апертуры // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 4. С. 38—42.
3. Назаров В. Н., Линьков А. Е. Дифракционные методы контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптич. журн. 2002. Т. 69, № 2. С. 76—81.
4. Зебрева К. А., Чугуй Ю. В. Расчет дифракционных явлений на 3D объектах постоянной толщины при различных конфигурациях освещения // Тр. VII Междунар. конф. „Прикладная оптика — 2006“. СПб, 2006. Т. 3. С. 258—267.
5. Чугуй Ю. В. Определение геометрических параметров протяженных объектов постоянной толщины по их дифракционным картинам // Автометрия. 1991. № 6. С. 76—92.
6. Иванов А. Н., Каракулев Ю. А., Михайлов В. М. Алгоритм измерения геометрических параметров объекта по его муар-интерференционной картине // Наст. выпуск. С. 33—37.

#### Сведения об авторах

**Виктор Николаевич Назаров**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

**Александр Николаевич Иванов**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов;  
E-mail: i\_off@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов

Поступила в редакцию  
26.04.11 г.

УДК 681.4.07

А. М. БУРБАЕВ, А. И. ЛЕОНТЬЕВА, Г. А. ОДИНОКИХ, Д. А. ФРЕНКЕЛЬ

### ПРИМЕНЕНИЕ ИНВАРИАНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СХЕМАХ КОНТРОЛЯ И ЮСТИРОВКИ ОЭП

Рассматриваются принципиальные особенности построения оптических схем контроля в процессе юстировки приборов, инвариантных ко всем или нерегистрируемым смещениям и поворотам оптической системы.

**Ключевые слова:** инвариантные оптические системы, автоколлиматор, схемы контроля и юстировки, уголкового отражатель.

Качество оптических приборов, производительность труда в процессе их сборки и технологическая себестоимость во многом зависят от методов и средств, применяемых при контроле и юстировке [1—3]. К современным схемам контроля предъявляются повышенные требования по точности и надежности в сочетании с возможностью автоматизации. В наибольшей степени таким требованиям отвечают методы и средства контроля, в схемах которых



применяются инвариантные оптические системы. Под инвариантностью оптической системы понимается неизменность ее свойств или невосприимчивость к изменению пространственного положения одного или нескольких ее элементов.

Инвариантные оптические системы известны достаточно давно и успешно применяются в оптических схемах измерительных, геодезических и других оптических приборов, обеспечивая их точность, надежность, универсальность, „нерасстраиваемость“ и возможность автоматизации процесса измерения [2, 4—6]. Вместе с тем информация о применении инвариантных оптических систем в схемах юстировки в технической литературе встречается чрезвычайно редко, хотя преимущества таких схем очевидны. Рассмотрение многообразных задач юстировки и принципиальных особенностей построения схем для их решения на основе инвариантных оптических систем, в том числе и разработанных на кафедре компьютеризации и проектирования оптических приборов СПбГУ ИТМО, является предметом исследования в настоящей статье.

Понятие „инвариантность“ носит относительный характер. Это означает, что оптическая система обладает неизменностью своих свойств лишь при определенных условиях, например только в параллельном пучке лучей, при поворотах или смещениях вокруг или вдоль определенных осей системы координат, связанной с данной оптической системой. Система может обладать так называемой „избирательной инвариантностью“ [7], т.е. быть инвариантной к углу отклонения осевого луча в одной плоскости и неинвариантной к отклонению осевого луча в плоскости, перпендикулярной первой. В дальнейшем будем рассматривать свойства инвариантных оптических систем в параллельном пучке лучей, где чаще всего осуществляется контроль.

Простейшим примером системы, инвариантной к отдельным смещениям и поворотам, является плоское зеркало. Если ось  $z$  неподвижной прямоугольной системы координат направить вдоль нормали к отражающей плоскости зеркала, то любые его смещения в плоскости  $хоу$ , параллельной отражающей плоскости, и повороты вокруг осей, параллельных нормали, инвариантны к направлению отраженных лучей и положению изображения.

Другим простым примером инвариантной системы может служить зеркальный ромб (ЗР) — система из двух параллельных друг другу зеркал. Любые сдвиги зеркального ромба, а также поворот его вокруг оси, параллельной нормальям к отражающим плоскостям, инвариантны к направлению отраженных лучей и положению изображения. Ромб-призма, эквивалентная по своему действию зеркальному ромбу, также инвариантна к любым сдвигам. В параллельном же ходе лучей любые сдвиги и повороты ЗР и ромб-призмы инвариантны. Пучок лучей, отраженный зеркальным ромбом, не изменяет своего направления.

Следующей оптической системой, представляющей интерес, является угловое (двойное) зеркало (УЗ) или призма с двумя отражающими гранями. В отличие от зеркального ромба, зеркала УЗ и грани призм не параллельны. Основным свойством этой системы является постоянство угла отклонения  $\delta$  отраженных лучей (по отношению к падающим) в плоскости главного сечения. Причем  $\delta = 2\sigma$ , где  $\sigma$  — угол между отражающими плоскостями (гранями). В сходящемся ходе лучей действие углового зеркала выражается в повороте пространства предметов вокруг ребра, образованного пересечением зеркал, на угол  $2\sigma$  в направлении от первого (по ходу лучей) зеркала ко второму. Отсюда следует инвариантность УЗ к повороту вокруг ребра. В призмах также имеется ось, параллельная ребру, образованному отражающими гранями, поворот вокруг которой инвариантен. В параллельном ходе лучей повороты вокруг любой оси, параллельной ребру, для призмы с двумя отражениями и УЗ инвариантны. Более того, как показывают исследования свойств этих систем, небольшие наклоны угловых зеркал (как и призм, им эквивалентных) вокруг осей, перпендикулярных ребру, обуславливают изменения угла  $\delta$  отклонения лучей в главном сечении лишь на величину второго порядка малости [1].

Наиболее интересной зеркальной системой является прямоугольный триэдр или уголко-вый отражатель. Другие названия этой системы — световозвращатель и трипельпризма. Призма, эквивалентная уголкового отражателю, обозначена в работе [1] как БкР-180°. Угол-ковый отражатель состоит из трех взаимоперпендикулярных отражающих граней. Его основ-ное свойство заключается в том, что он отражает лучи в строго обратном направлении, неза-висимо от угла их падения.

Свойства перечисленных выше зеркально-призменных систем могут быть описаны мат-рицами их действия на направление падающих лучей [1, 8]. Приведем выражения для матриц наиболее часто применяемых инвариантных зеркально-призменных систем.

Для УЗ, в случае когда угол  $\sigma$  между зеркалами составляет 90°, а ось  $z$  направлена вдоль ребра, матрица имеет следующий вид:

$$P''_{\sigma=90^\circ} = - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} = -P'_{\text{ЭКВ}},$$

где  $P'_{\text{ЭКВ}}$  — матрица плоского зеркала, перпендикулярного ребру прямоугольного УЗ, эквива-лентного по своему действию угловому зеркалу в параллельном ходе лучей; для исключения отрицательного знака перед матрицей следует поменять на противоположные знаки всех ор-тов пространства предметов.

Для ромб-призмы, когда  $\sigma = 0$ ,

$$P''_{\sigma=0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = E,$$

где  $E$  — единичная матрица.

Для прямоугольного триэдра (уголкового отражателя) в любой системе координат мат-рица определяется как

$$P'''_{\sigma_{\text{ЭКВ}}} = - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = -E.$$

Рассмотрим конкретные примеры применения инвариантных оптических систем, при-меняемых в схемах контроля и юстировки оптических приборов.

**Пример 1.** Рассмотренные выше зеркальный ромб и призма БкР-180° широко исполь-зуются в схемах контроля, выверки и юстировки многоканальных приборов, для параллель-ного переноса пучка лучей излучающих систем, например коллиматоров, лазеров, а также ви-зирных осей зрительных труб, тепло- и телевизионных камер, автоколлиматоров.

**Пример 2.** На рис. 1 показана схема специального искателя, составленного из светоде-лительного куба-призмы 3 и уголкового отражателя 2. Искатель предназначен для облегчения поиска автоколлимационного изображения, образуемого зеркалом 1 малого размера, и для приведения его в поле зрения автоколлиматора 4, имеющего, как правило, малое угловое по-ле зрения. Оператор через куб-призму искателя наблюдает два освещенных поля и посредст-вом наклонов автоколлиматора совмещает эти два поля. В этот момент в поле зрения авто-коллиматора появляется автоколлимационное изображение. Покажем, что угловое положение искателя не влияет на взаимное положение совмещаемых полей. Для этого нужно доказать, что угол между ортом  $\mathbf{A}$  осевого луча, выходящего из автоколлиматора 4, и ортом  $\mathbf{A}'$  луча,

отраженного от плоского зеркала *1*, и в отсутствие специального искателя, и при его установке сохраняет свое значение. Величину угла  $\delta$  можно найти из скалярного произведения указанных ортов:

$$\cos\delta = \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}'.$$

После установки в ход лучей искателя пучок разделяется, но и при этом каждая его часть отражается от одной и той же светоделительной грани. В работе [8] доказано, что угол между векторами после отражения в плоском зеркале не изменяется. Следовательно, угловое положение искателя не влияет на взаимное положение совмещаемых полей и точная его установка не требуется.

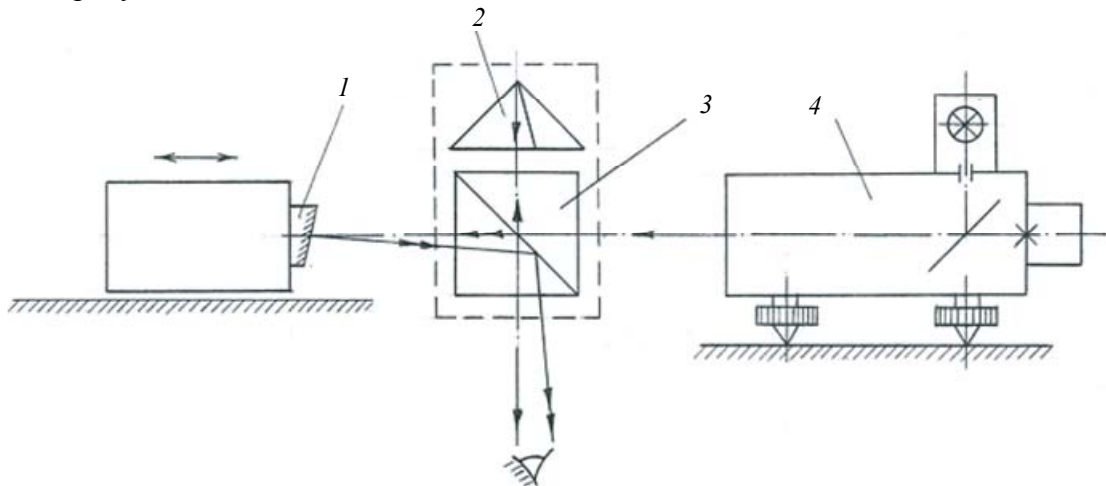


Рис. 1

**Пример 3.** На рис. 2 приведена схема приспособления ГК-3 для горизонтального дальномера ИКУ-2. При сборке этого устройства необходимо обеспечить строгую параллельность рабочих плоскостей доведенных до зеркальной точности стальных угольников 2 и 3, установленных на едином основании 1 и повернутых в противоположные стороны. Для контроля следует использовать автоколлимационный метод с разделением зрачка автоколлиматора 4, а также вспомогательный отражатель 5 в виде призмы БкР-180° (уголкового отражателя).

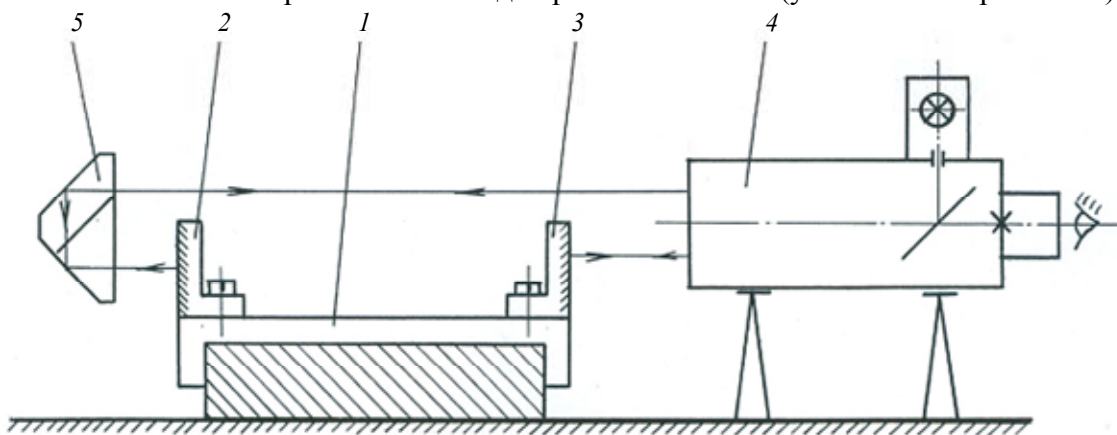


Рис. 2

**Пример 4.** В оптической системе, представленной на рис. 3, при юстировке автоколлимационной трубы 1, содержащей окуляр со светоделительным кубиком и две сетки — основную 2 и автоколлимационную 3, необходимо не только совместить обе сетки с фокальной плоскостью объектива трубы, но и устранить взаимный разворот штрихов сеток, а также совместить центры их перекрестий, т.е. совместить визирные оси коллиматорной ветви и приемной.

Обычно для этих целей используют контрольную зрительную трубу, которую устанавливают перед юстируемой. Юстировку осуществляют подвижками сетки 3. Однако результат

юстировки приходится контролировать путем наблюдения в окуляр контрольной трубы. В интервале между двумя переходами этой операции юстировщику приходится перемещаться от одного окуляра к другому (автоколлимационные трубы обычно длиннофокусные) и, более того, находясь у окуляра юстируемой трубы 1, осуществлять подвижки наугад. Иными словами, операции контроля и собственно юстировки оказались в данном случае разделенными в пространстве и во времени, что увеличивает затраты времени на юстировку.

Совсем другой результат достигается, если вместо контрольной трубы применить угловой отражатель 4. Тогда в поле зрения юстируемой трубы 1 наблюдаются две сетки 2 и 3. В этом случае необходимо автоколлимационное изображение совместить с перекрестием основной сетки 2 (приемной ветви).

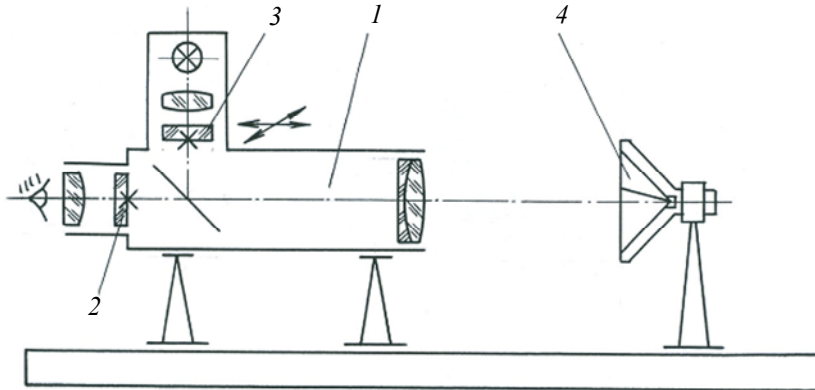


Рис. 3

**Пример 5.** На рис. 4 представлена оптическая система цехового интерферометра ИТ-100, построенного по схеме Физо; здесь: 1 — ртутная лампа, 2 — конденсор, 3 — точечная диафрагма, 4 — зеркало, 5 — полупрозрачная пластина, 6 — объектив, 7, 8 — клинья-эталон, 9 — оправа клиньев, 10 — предметный столик, 11 — револьвер с проекционными объективами и отверстием, 12 — окуляр-микрометр. При юстировке интерферометра необходимо достичь телецентричности пучка лучей в пространстве образования интерференционных полос равной толщины. Это означает, что помимо обеспечения плоскостности волнового фронта, необходимо также обеспечить перпендикулярность пучка лучей эталонной плоскости „А“ клиньев интерферометра.

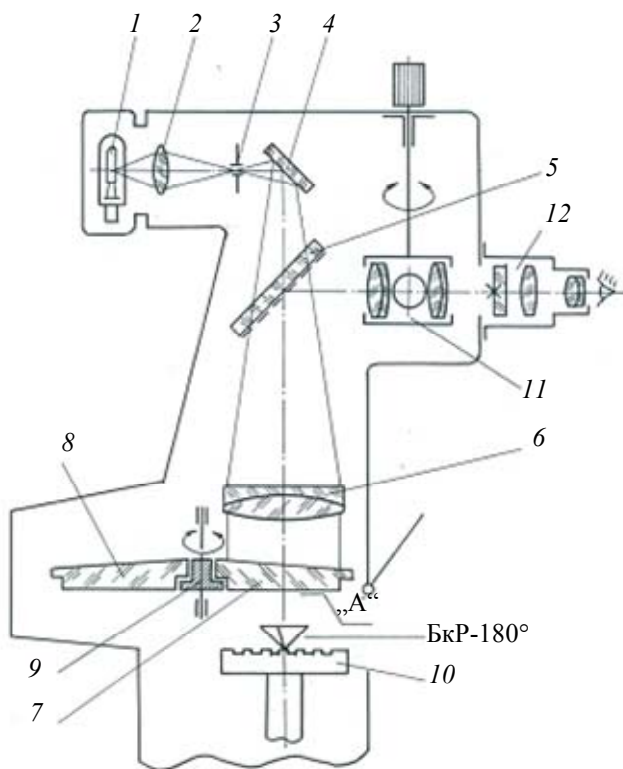


Рис. 4

Классическое решение этой задачи — совмещение автоколлимационного изображения точечной диафрагмы от плоскости „А“ с самой диафрагмой, наблюдаемое со стороны выхода пучка из диафрагмы. Однако по многим причинам, в первую очередь, из-за труднодоступности и слабой освещенности изображения, сделать это сложно. Решение задачи можно упростить, если на предметный столик установить трипельпризму, что позволяет как бы повернуть коллиматорную ветвь на  $180^\circ$ , направляя пучок света на клин снизу. Тогда в окуляр наблюдаются два

предметный столик установить трипельпризму, что позволяет как бы повернуть коллиматорную ветвь на  $180^\circ$ , направляя пучок света на клин снизу. Тогда в окуляр наблюдаются два

изображения точечной диафрагмы. Посредством наклонов зеркала 4 совмещают оба изображения, а путем наклонов пластины 5 приводят их в центр поля зрения.

**Пример 6.** В процессе юстировки узла клиньев рассмотренного выше интерферометра ИТ-100 необходимо установить главные сечения двух клиньев, круглых по форме, параллельно диаметральной плоскости их оправы (имеющей форму круглого диска  $\varnothing 400$  мм), проходящей через геометрические центры клиньев с погрешностью  $\pm 2^\circ$ .

Использование коллимационной схемы контроля (с приставным коллиматором — „утенком“) создает дополнительную непростую задачу — выставление в заданной плоскости визирной оси зрительной трубы, фиксирующей направление отклоненного клином пучка.

Поиск более рациональной схемы контроля привел авторов к решению применить автоколлимационный метод в сочетании с отражателем, обладающим особыми свойствами: он должен быть инвариантным к углу отклонения пучка лучей клином в его главном сечении, но чувствительным к развороту клина вокруг оптической оси системы. Таким отражателем оказалась призма БР-180° (рис. 5).

До установки в ход лучей клина 2 визирная ось автоколлимационной трубы 3 выставляется перпендикулярно ребру Р призмы 1 путем совмещения автоколлимационного изображения перекрестия с перекрестием основной сетки. При введении в пучок лучей клина автоколлимационное изображение в поле зрения сместится вдоль оси  $x$ , параллельной ребру Р призмы, если главное сечение клина окажется неперпендикулярным ребру Р. Установку же ребра призмы перпендикулярно заданной диаметральной плоскости оправы можно осуществить конструктивно — базированием оправы призмы в приспособлении, на которое устанавливается юстируемый узел клиньев.

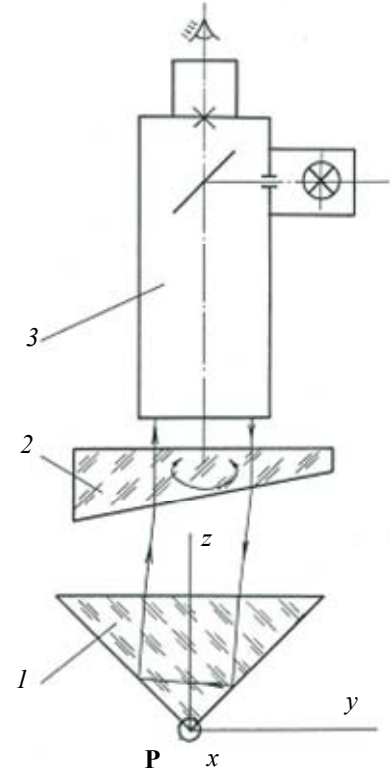


Рис. 5

**Пример 7.** Довольно часто в процессе юстировки приборов возникает задача контроля угла отклонения пучка света, отраженного зеркалом, когда угол отклонения отличается от  $90^\circ$ . В таких приборах, например, как измерительные проекторы требуемая точность установки зеркал составляет несколько угловых минут [8].

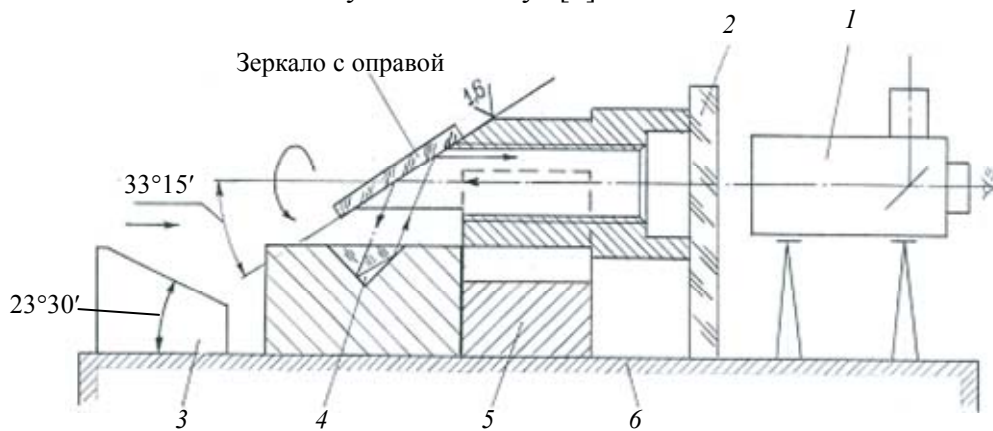


Рис. 6

Рассмотрим оптическую систему, схема которой приведена на рис. 6. Автоколлимационный контроль угла отклонения отраженного пучка света осуществляют в два этапа. На первом этапе зеркало в оправе, имеющей цилиндрическую ступенчатую форму с отверстием

внутри, базируют в стальной призме 5 таким образом, чтобы плоскость падения отраженного осевого луча оказалась перпендикулярной плоскости контрольной плиты 6, на которой собрана данная установка. Для этой цели используют отражатель 4 в виде призмы БР-180°, ребро прямого угла которой параллельно основанию оправы.

Разворотом оправы с зеркалом на призме 5 приводят автоколлимационное изображение перекрестия трубы 1, установленной с использованием вспомогательного зеркала 2, в центр поля зрения. Посредством поворота на плите 6 отражателя 4 устраняют разворот автоколлимационного изображения по отношению к собственному перекрестию трубы 1. На втором этапе отражатель 4 заменяют отражателем 3, имеющим вид короткого валика из закаленной стали ХВГ со скошенным торцом. Оба торца валика представляют собой доведенные до оптической точности плоскости, причем двугранный угол  $\sigma$ , образованный торцами контрольного валика, равен  $\sigma = 90^\circ - \delta$ , где  $\delta$  — угол отклонения осевого луча. Разворотом отражателя 3 автоколлимационное изображение приводят в центр поля. Его смещение в вертикальной плоскости определяет погрешность угла отклонения.

Таким образом, на примере рассмотренных инвариантных оптических систем показано, что их применение в схемах контроля и юстировки ОЭП придает компактность схемам и значительно упрощает сам технологический процесс, позволяя повысить его производительность за счет сокращения числа используемых средств контроля, легкости установки этих систем как внутри прибора, так и в схемах контроля отдельных узлов, обеспечения доступности к регулируемым элементам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погарев Г. В. Юстировка оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1982. 237 с.
2. Сухопаров С. А. На службе оптическому приборостроению. Сер. „Выдающиеся ученые Университета ИТМО“. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. Вып. 14. 218 с.
3. Бурбаев А. М. Пути обеспечения технологичности конструкций оптических приборов и совершенствования сборочных процессов. Современные технологии: Сб. научных статей / Под ред. С. А. Козлова и В. О. Никифорова. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2002. 318 с.
4. Левин Б. М., Шевцов И. В., Зайцев И. В. и др. Прибор для автоматической регистрации непрямолинейности поверхности // Измерительная техника. 1970. № 1.
5. Сухопаров С. А., Горлушкина Н. Н. Автоматический телевизионный измерительный модуль // Оптич. журн. 1994. № 9. С. 85—88.
6. Горбачёв А. А., Коняхин И. А., Тимофеев А. Н. Построение инвариантных оптических схем оптико-электронных систем с сопряженным матричным полем анализа // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 10. С. 54—57.
7. Син Сянмин. Определение параметров контрольного элемента углоизмерительной ОЭС с избирательной инвариантностью // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2006. Вып. 26.
8. Погарев Г. В., Киселев Н. Г. Оптические юстировочные задачи: Справочник. Л.: Машиностроение, 1989. 260 с.

#### Сведения об авторах

**Амир Маруанович Бурбаев**

— доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов;  
E-mail: aburbaev@mail.ru

**Алена Игоревна Леонтьева**

— студентка; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

**Глеб Андреевич Одиноких**

— студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

Давид Александрович Френкель

— студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов

Поступила в редакцию  
26.04.11 г.

УДК 62.378

Г. Г. ИШАНИН, Г. В. ПОЛЬЩИКОВ, Е. И. ШЕВНИНА

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФРЕНЕЛЕВСКИХ ОТВЕТВИТЕЛЕЙ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПРОХОДНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Проанализированы схемы построения френелевских ответвителей для проходных измерителей энергетических параметров лазерного излучения. Определены области использования ответвителей в зависимости от их конструктивного исполнения.

**Ключевые слова:** френелевский ответвитель, проходной измеритель, поляризация.

В практике физического эксперимента проходные системы контроля энергетических параметров лазерного излучения используются достаточно широко. Применение таких систем повышает воспроизводимость результатов особенно при относительных измерениях.

Кроме широко распространенных встроенных систем оперативного контроля, используются проходные измерители энергетических параметров излучения, разработанные в качестве приборов, функционирование которых не зависит от схемы конкретной экспериментальной или технологической установки. Определяющее отличие проходных измерителей от систем оперативного контроля заключается в возможности их включения в оптическую схему установки или удаления из нее, при этом работа экспериментальной или технологической установки не нарушается.

В соответствии с вышесказанным проходной измеритель должен обеспечивать минимальное искажение первоначального пучка излучения, и в определенных пределах его показания не должны зависеть от вариации других параметров лазерного излучения. В качестве базовой можно предложить разработанную авторами следующую структуру проходного измерителя параметров лазерного излучения (рис. 1):

1 — ответвитель лазерного излучения, обеспечивающий точное и стабильное выделение малой части исходного потока; важнейшей характеристикой ответвителя является его коэффициент прозрачности и чувствительность к поляризационным и спектральным искажениям, а также чувствительность к погрешностям юстировки;

2 — компенсатор геометрических искажений исходного пучка лазерного излучения, которые возникают под действием ответвителя; основные требования к этому элементу — обеспечение минимальных и стабильных энергетических искажений при компенсации геометрических;

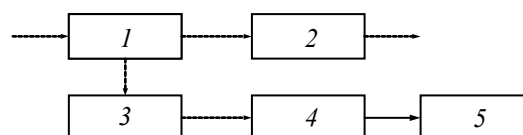


Рис. 1



3 — компенсатор поляризационных и спектральных (при необходимости) искажений измерительного канала;

4 — измерительный преобразователь (приемник излучения);

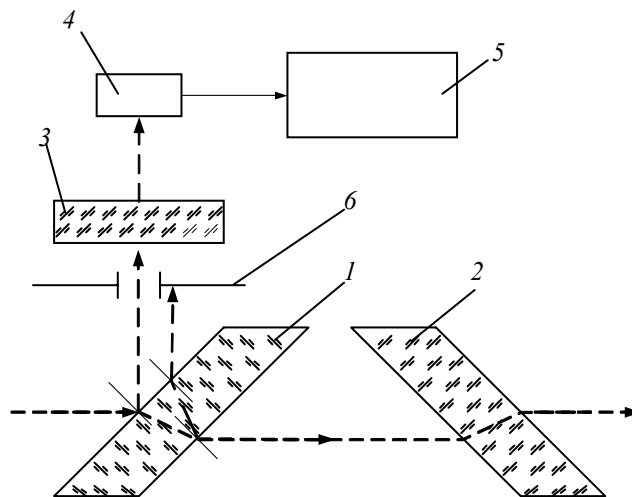
5 — электронный блок обработки сигнала.

Прибор, построенный в соответствии с такой структурной схемой, может быть установлен в какую-либо систему или изят из нее без нарушения работоспособности системы и без ее дополнительной юстировки.

Практически всегда при использовании ответвителей потока излучения образуются несколько дополнительных пучков излучения, энергетические соотношения между которыми связаны как с параметрами измеряемого потока, так и с параметрами измерительной системы. Это создает предпосылки к созданию многоканальных измерительных систем проходного типа. В зависимости от используемой оптической схемы можно увеличить информативность измерительного устройства и обеспечить более эффективную компенсацию возникающих погрешностей.

Необходимость четкого согласования конкретного ответвителя (как оптической детали) с системой компенсации энергетических искажений обуславливает целесообразность представления их в структуре измерительной системы как единого целого.

Рассмотрим общую схему проходного измерителя на примере классического проходного измерителя с френелевским ответвителем [1] (рис. 2). В данной схеме в качестве ответвителя лазерного излучения используется плоскопараллельная пластинка 1, которая выделяет малую часть общего потока. Компенсатором геометрических искажений служит аналогичная плоскопараллельная пластинка 2, расположенная зеркально по отношению к первой. Излучение, переотраженное от второй грани первой плоскопараллельной пластинки, „отрезается“ диафрагмой 6. Компенсатором поляризационных искажений в данной схеме служит поляризатор 3, установленный на входе приемника излучения 4. Сигнал с приемника поступает на электронный блок обработки сигнала 5, с которого снимаются показания для дальнейшего использования.



Прежде чем рассматривать возможные схемы построения ответвителя, необходимо четко сформулировать требования к ним.

Во-первых, это требования к ответвителю как к проходному элементу оптической системы, который может присутствовать либо отсутствовать в составе установки. Это означает, что коэффициент прозрачности должен стремиться к единице и должны отсутствовать искажения геометрических параметров падающего потока излучения. Ответвитель не должен обладать оптической силой, и его установка, по возможности, не должна вызывать смещение оси пучка излучения и изменять направление его распространения.



Во-вторых, это требования по обеспечению точности работы прибора. Существенная часть общей погрешности измерителя возникает за счет интерференции пучков излучения, отраженных от передней и задней поверхностей светоделителя. Для защиты прибора от интерференционного источника погрешности необходимо либо использовать только потоки излучения, отраженные от одной поверхности оптической детали, либо разделять потоки в оптической схеме так, чтобы не допустить интерференции.

Использование эффекта просветления задней поверхности светоделителя существенно увеличивает коэффициент прозрачности ответвителя и уменьшает интерференционную погрешность, но полностью ее не исключает. Поэтому в данном случае используется принцип разделения пучков излучения за счет позиционного смещения (увеличения оптической толщины детали) либо за счет углового разделения пучков отраженного излучения (с использованием клиньев и призм) с последующим геометрическим разделением потока.

Третье важное требование, которое необходимо учитывать при проектировании схемы ответвителя, — это обеспечение адекватности поляризационной структуры ответвленного пучка излучения поляризационной структуре падающего пучка.

Для определения величины потока излучения контрольного канала используются амплитудные ( $r$ ) и энергетические ( $R$ ) значения коэффициента отражения для  $p$ - и  $s$ -компонентов излучения лазера. Согласно закону Снеллиуса соотношение между углами падения и преломления света ( $i_1, i_2$ ) на границе раздела двух сред имеет следующий вид [2]:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2, \quad (1)$$

тогда отражение от этой границы характеризуется коэффициентами

$$r_p = \operatorname{tg}(i_1 - i_2) / \operatorname{tg}(i_1 + i_2) \text{ и соответственно } R_p = r_p^2, \quad (2)$$

$$r_s = -\sin(i_1 - i_2) / \sin(i_1 + i_2) \text{ и соответственно } R_s = r_s^2. \quad (3)$$

Как показывает несложный анализ выражений (2) и (3), выполнить третье требование путем простой установки поляризатора не удастся. Необходима его четкая ориентация для компенсации неравенства коэффициентов отражения. Используя закон Малюса для пропускания поляризатором отдельных компонентов излучения, получаем равенство [3]

$$R_p \cos^2 \gamma = R_s \sin^2 \gamma,$$

из которого можно найти значение компенсирующего угла разворота поляроида:

$$\gamma = \arctg \sqrt{R_p / R_s}.$$

В случае плоскополяризованного излучения большое значение коэффициента прозрачности можно обеспечить, используя разделяющие поверхности при угле падения света, близком к углу Брюстера. Однако приходится учитывать, что если для  $p$ -компонента при данном угле падения коэффициент отражения резко уменьшается, то для  $s$ -компонента происходит даже некоторое его увеличение. Следовательно, применение такого разделителя характеризуется существенными поляризационными искажениями, влияние которых проявляется двояко. Во-первых, значения коэффициента прозрачности для  $p$ - и  $s$ -компонентов существенно различаются и в зависимости от конкретного исполнения могут отличаться в 20—40 раз; во-вторых, поляризационные искажения приводят к появлению дополнительных ошибок. Эллиптичность плоскополяризованного излучения на уровне 1 % считается достаточно малой; ее флуктуации в диапазоне 0,5—1,5 % приведут при измерении к ошибке 10—50 %, что, безусловно, недопустимо. Кроме того, по мере приближения значения угла падения света к углу Брюстера происходит все более сильное изменение коэффициента отражения. Поэтому при использовании этого метода увеличения коэффициента прозрачности приходится применять специальные компенсационные меры.

На рис. 3, в развитие общей схемы (см. рис. 2), приведена оптическая схема ответвителя, в которой, в отличие от предыдущего варианта, для компенсации поляризационных иска-

жений используется отражение от гипотенузной поверхности призмы 2. В этой схеме производится совместная обработка сигналов двух измерительных каналов, и влияние отклонения падающего луча относительно оси измерителя компенсируется дополнительным приемным узлом 6—8. При повороте оси потока излучения относительно оси ответвителя при уменьшении отражения от плоскопараллельной пластинки 1 происходит увеличение отражения от плоскопараллельной пластинки 5. Сигналы от приемников излучения 4, 8 поступают в блок обработки, где вырабатывается компенсированный сигнал. Рассеивающие фильтры 3 и 7 защищают приемник излучения от „горячих“ зон сечения пучка.

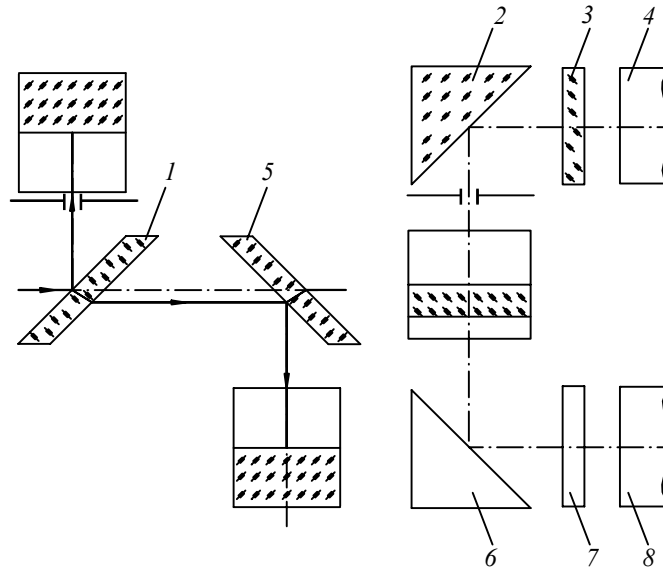


Рис. 3

К недостаткам рассмотренных схем следует отнести их достаточно большие габариты в осевом направлении, так как для исключения интерференционных искажений разделение пучков, отраженных и переотраженных от поверхностей, происходит за счет увеличения

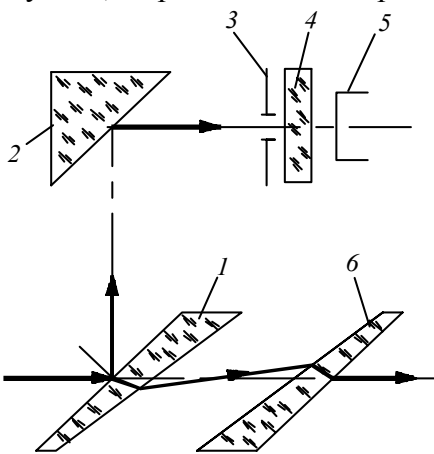


Рис. 4

толщины плоскопараллельных пластинок. С увеличением оптической толщины детали повышаются требования к качеству материала. При больших диаметрах пучка излучения лазера такая схема разделения пучков становится практически нереализуемой.

В связи с этим была разработана схема ответвителя (рис. 4) с клиновидным разделительным компонентом 1 и клиновидным компенсатором геометрических искажений 6 [4]. Излучение лазера подается на переднюю поверхность клина 1 и после отражения направляется на гипотенузную грань призмы 2. Для удобства отображения оптической схемы на рис. 4 плоскость расположения призмы 2, диафрагмы 3, рассеивателя 4 и приемника 5 развернута на 90°. Реально она должна быть ортогональна плоскости падения излучения на клин 1.

Пучок излучения, отраженный от задней поверхности клина, претерпевает отклонение на двойной угол клина и не проходит через диафрагму 3. Важным достоинством этого типа ответвителя является то, что оптический клин формирует веер переотраженных пучков, которые можно использовать при синтезе многоканального измерителя.

Достаточно часто требуется обеспечить большое значение коэффициента прозрачности проходного измерителя при использовании излучения с неявно выраженной поляризационной структурой или даже неполяризованного излучения. Большой скачок коэффициента пре-

ломления на границе раздела сред в рассмотренных схемах ограничивает возможности их развития в этом направлении.

На рис. 5 представлена схема ответвителя, основой которого является оптический блок, составленный из призм 1, 2, 3, 4, выполненных из материалов с различными показателями преломления. Материалы призм могут быть выбраны так, что благодаря дисперсии оптических свойств происходит выравнивание чувствительности измерителя в целом.

Передняя поверхность призмы 1 и задняя поверхность призмы 2 просветлены для увеличения коэффициента прозрачности. Призмы 3 и 4 представляют собой компенсаторы поляризационных искажений основного измерительного канала, в который входят рассеиватель 5 и приемник излучения 6. Наличие дополнительного канала 7, 8 позволяет производить дополнительные, необходимые в конкретном случае, измерения параметров потока излучения. Подобная схема может быть реализована в виде компактной оптико-электронной измерительной головки с коэффициентом пропускания до 0,96—0,98.

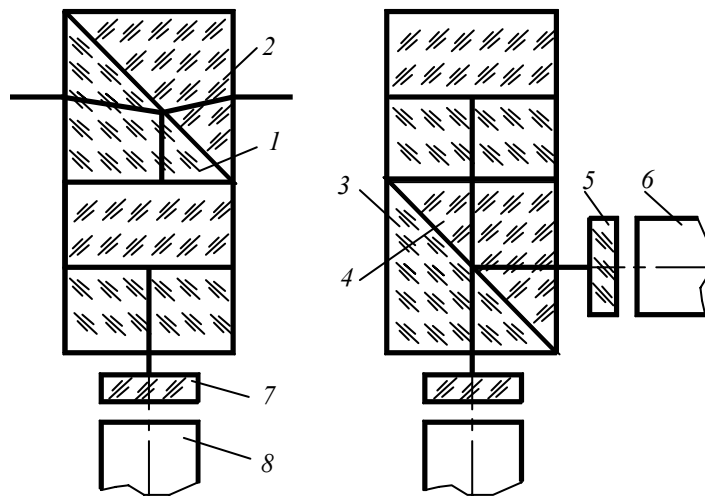


Рис. 5

Подобная схема может быть реализована в виде компактной оптико-электронной измерительной головки с коэффициентом пропускания до 0,96—0,98.

В представленном обзоре наиболее перспективных схем ответвителей лазерного излучения для построения проходных измерителей его энергетических параметров отсутствует их математическое описание и анализ свойств при конкретном исполнении. Подобные материалы имеют большой объем для каждой из приведенных схем и требуют рассмотрения в отдельных публикациях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Измерение энергетических параметров и характеристик лазерного излучения / Под ред. А. Ф. Котюка. М.: Радио и связь, 1981.
2. Берри Р. У. и др. Физика тонких пленок: Пер. с англ. Т. 2. Современное состояние исследований и технические применения / Под общ. ред. Г. Хасса, Р. Э. Туна. М.: Мир, 1967. 396 с.
3. Волкова Е. А. Поляризационные измерения. М.: Изд-во стандартов, 1974.
4. Польщиков Г. В., Шевнина Е. И. Анализ возможности стабилизации параметров проходного измерителя потока лазерного излучения // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2005. Вып. 18.

#### Сведения об авторах

**Геннадий Григорьевич Ишанин**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: Ishanin@mail.ru

**Георгий Владимирович Польщиков**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: polschikov@list.ru

**Елена Ивановна Шевнина**

— ООО „СокТрейд“, Санкт-Петербург; ведущий инженер; E-mail: eshevnina@soctrade.ru

Рекомендована кафедрой компьютеризации и проектирования оптических приборов СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию 26.04.11 г.

## SUMMARY

P. 7—13.

### DESIGN OF AUTOMATED ASSEMBLY LINE FOR MICROSCOP LENS

Problems in construction of automated line for assembly, adjustment, and quality control of production microlenses are considered. A concept of the line design is presented.

**Keywords:** microscope objective, assembly, automating, adjustment, testing.

#### *Data on authors*

- Svyatoslav M. Latyev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; Head of Department; E-mail: Smlatyev@yandex.ru
- Alexander P. Smirnov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: apsmirnov@bk.ru
- Alexey G. Tabachkov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: aletlab@yandex.ru
- Dmitry N. Frolov* — Cand. Techn. Sci.; Firm “Focus”, St. Petersburg; E-mail: fronda@list.ru
- Rodion V. Shukhat* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design

P. 14—21.

### UNIFICATION OF OPTICAL AND MECHANICAL DESIGN OF LENS MICROOBJECTIVES

Principles of microlens unification are considered. The principles allows the development of a rational basic construction and family of typical lenses most commonly used, and to increase the effectiveness of lens manufacturing, assembly, and testing.

**Keywords:** microlens, unification, design.

#### *Data on authors*

- Svyatoslav M. Latyev* — Dr. Techn. Sci., Professor, St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; Head of Department; E-mail: Smlatyev@yandex.ru
- Alexey G. Tabachkov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: aletlab@yandex.ru
- Dmitry N. Frolov* — Cand. Techn. Sci.; Firm “Focus”, St. Petersburg; E-mail: fronda@list.ru
- Anatoly S. Reznikov* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design

P. 22—28.

### MATHEMATICAL MODEL OF AUTOMATED ASSEMBLY OF MICROLENSES

Mathematical relations are derived to constitute the base for algorithm of automated assembly of microlenses. Technological errors of the lens components manufacturing are taken into account.

**Keywords:** microlens, assembly, automating, model.

#### *Data on authors*

- Alexander P. Smirnov* — Dr. Techn. Sci., Professor, St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: apsmirnov@bk.ru
- Svyatoslav M. Latyev* — Dr. Techn. Sci., Professor, St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; Head of Department; E-mail: Smlatyev@yandex.ru

P. 28—32.

### AUTOMATED RECALCULATION OF OPTICAL SCHEME IN INSTRUMENT DESIGN

A computer program of selective weight optimization of optical instrument scheme with respect to integral aberrational criteria is developed. The method of random generation of initial optical scheme parameter distributed uniformly over the factor space is employed. Examples of calculations are presented.

**Keywords:** design, optical system, programming in MathCAD.

#### *Data on authors*

- Alexander P. Smirnov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: apsmirnov@bk.ru
- Anatoly S. Reznikov* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design
- Dmitry A. Abramov* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design

P. 33—37.

### ALGORITHM FOR OBJECT GEOMETRICAL PARAMETERS DETERMINATION BY MOIRÉ FRINGE PATTERN

A method of moiré fringe pattern processing based on parametric equation linking the moiré fringe shape with geometry of the object under control is described. A procedure of preliminary image processing to suppress the noise is proposed.

**Keywords:** moiré fringes, image processing.

#### *Data on authors*

- Alexander N. Ivanov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: i\_off@mail.ru
- Yury A. Karakulev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design
- Vitaly M. Mikhailov* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: mynameisvitalik@gmail.com

P. 37—43.

### APPLICATION OF A DISPERSIVE ELEMENT FOR ADJUSTMENT OF ZEHNDER — MACH INTERFEROMETER

Principles of spectral interferometry are formulated, and mechanism of moiré fringe pattern formation is described for the case of a dispersive element introduced at the interferometer output. The dispersive element application is shown to expand dynamic range of fringe registration when zero path difference is searched for, and to simplify and accelerate the interferometer adjustment.

**Keywords:** spectral interferometry principles, Zehnder — Mach interferometer, moiré fringe, wave train, coherent wave length.

#### *Data on authors*

- Amir M. Burbaev** — Associate Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: aburbaev@mail.ru
- Vadim V. Zyuzin** — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design
- Maksim G. Lukin** — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design
- Sergey A. Marusov** — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design
- Vladimir I. Mischenko** — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design

P. 43—48.

### PYROMETER FOR INSPECTION OF WIRES TWISTING IN ELECTRIC MAINS

An operator-served pyrometer for detection of overheated wires twisting in electric main is described. The instrument is mounted on a track platform; it includes IR measuring channel, visual optical TV channel, and pointing drive. The overheat detection levels comprise 200, 400, and 600 C held to within 2 C.

**Keywords:** pyrometer, infrared channel, visual channel.

#### *Data on author*

- Igor T. Razumovsky** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: itraz@rambler.ru

P. 49—53.

### CONTROL OVER GEOMETRICAL PARAMETERS OF AN OBJECT BY LOCATION OF INFLECTION POINTS IN FRAUNHOFER DIFFRACTION PATTERN

A method of estimation of object size by position of inflection points in the main maximum of diffraction pattern is proposed. The method is shown to possess a high sensitivity to variation of the object size and allows performing the measurements with accuracy of 0,1 microns.

**Keywords:** diffraction, inflection points, control of geometrical parameters.

#### *Data on author*

- Alexander N. Ivanov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: i\_off@mail.ru

P. 53—56.

### DIFFRACTION METHOD OF CONTROL OVER SPATIAL POSITION OF OBJECTS WITH VARIABLE SCALE OF FOURIER SPECTRUM

A diffraction scheme is proposed for control over linear and angular displacements of an object with variable scale of Fourier spectrum. A mathematical model is developed to describe amplitude and phase distribution of light field in registration plane. Experimental results are shown to be in good agreement with model calculations.

**Keywords:** diffraction, interference, diffraction measurements.

#### *Data on authors*

- Viktor N. Nazarov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design;  
E-mail: naz\_1946@mail.ru
- Yury A. Sokolov** — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design;  
E-mail: sokolov-juri@yandex.ru

P. 56—60.

### APPLICATION OF THERMAL STORAGE MODE TO THERMOELASTIC CONVERTER USED IN MULTICHANNEL MEASURING SYSTEMS

The possibility of application of the thermal storage phenomenon in radiation detectors on the base of thermoelastic effect to multichannel photometric systems is investigated. Possible errors in measurement of energetic parameters of laser radiation are analyzed, and ways to eliminate the error sources are considered.

**Keywords:** thermoelastic effect, crystal quartz, thermal storage.

#### *Data on authors*

- George V. Polshchikov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design;  
E-mail: polschikov@list.ru
- Elena I. Shevnina** — SocTrade Process Engineering Ltd., St. Petersburg; Leading Engineer;  
E-mail: eshevnina@soctrade.ru
- Lam Son Pham** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: psonlamvn@yahoo.com
- Natalia V. Shalygina** — Applicant; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design;  
E-mail: SHAL1976@mail.ru

P. 60—64.

### GONIOSPECTRORADIOMETRIC METHOD FOR DETERMINATION OF SPATIAL SPECTRAL CHARACTERISTICS OF LOCAL LIGHT FIELDS

A method is presented for determination of spatial spectral characteristics of local light fields. Measuring installation schematics for experimental approbation of the method is described. Application of the method to problems in aviation instrument manufacturing is justified.

**Keywords:** spatial spectral measurements, local light fields, spectrophotometry.

#### *Data on authors*

- Vadim V. Rozhentsov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: Vadim.Rozhentsov@transas.com
- Roman K. Mamedov** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: Romamedov@yandex.ru

P. 65—69.

### MODERNIZED DESIGN OF PHOTOELECTRIC INDICATOR OF LINEAR MOVEMENTS

Upgrade of design of photovoltaic indicators of linear displacements is described. A scheme of control device using the indicator of spherical surface curvature radius is presented.

**Keywords:** photovoltaic indicators, linear measurements.

#### *Data on authors*

- Olga A. Abakshina** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design
- Gennady V. Egorov** — Associate Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design
- Svyatoslav M. Latyev** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; Head of Department; E-mail: Smlatyev@yandex.ru
- Sergey S. Mitrofanov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: m1990s@mail.ru

P. 69—72.

### MOIRÉ-INTERFERENCE PATTERN FORMATION ON DIFFRACTION AT CLEARANCE BETWEEN EDGE OF FINITE THICKNESS AND REFLECTING SURFACE

A model is analyzed of moiré-interference pattern formation on diffraction at clearance between edge of finite thickness and plane reflecting surface. A relation between the edge thickness and the fringe shape is derived.

**Keywords:** diffraction, moiré fringes, measurement.

#### *Data on author*

- Viktor N. Nazarov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: naz\_1946@mail.ru
- Alexander N. Ivanov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: i\_off@mail.ru



P. 72—79.

### APPLICATION OF INVARIANT OPTICAL SYSTEMS IN OPTICAL INSTRUMENT CONTROL AND ADJUSTMENT SCHEMES

Adjustment of optical instruments invariant to all (or not registered) displacements and rotations is considered. Principle features of design of optical control schemes used in the procedure are described.

**Keywords:** invariant optical systems, autocollimator, control and adjustment schemes, corner cube retroreflector.

#### *Data on authors*

- Amir M. Burbaev* — Associate Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: aburbaev@mail.ru
- Alyona I. Leontieva* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design
- Gleb A. Odinkikh* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design
- David A. Frenkel* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design

P. 79—83.

### APPLICATION OF FRESNEL DIVIDERS IN DESIGN OF PASSAGE DETECTORS OF LASER RADIATION POWER

Schemes of Fresnel dividers for passage detectors of laser radiation power are analyzed. Domain of the divider applicability is determined depending of its construction.

**Keywords:** Fresnel divider, passage detector, polarization.

#### *Data on authors*

- Gennady G. Ishanin* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: Ishanin@mail.ru
- George V. Polshchikov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: polschikov@list.ru
- Elena I. Shevnina* — SocTrade Process Engineering Ltd., St. Petersburg; Leading Engineer; E-mail: eshevnina@soctrade.ru