



Учредитель и издатель – Общественная научно-техническая
академия «Контенант»
Издается с 2002 г.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ НАУЧНОЙ РОТЫ	3
Скляр Э.Э. Преимущества и классификация статических фурье-спектрометров	4
Масликов В.Н. Технология измерения промаха для летных испытаний высокоскоростных средств самонаведения на основе лазерной дальнометрии	11
Коробко С.Д. Синтез релейного закона управления гидравлического привода методом учёта малых постоянных времени	14
Пронин Р.И. Моделирование гистерезисной нелинейности в пакете simulink системы matlab	18
Ларин А.В. Магнитометрический измеритель крена для быстровращающихся объектов	24
Цайзер М.С. Гирокоординатор на микромеханических датчиках	29
Девятериков Е.В. Применение в астрономии пьезоэлектрических двигателей, обеспечивающих увеличение ресурса работы и повышение точности юстировки оптических элементов	33
Гуров А.Н. Система автоматизированного мониторинга сетевой инфраструктуры	35
Кузнецов Д.В., Кутаков А.Г. Методика проектирования баз данных для систем моделирования двусторонних боевых действий	37
Гуров А.Н. Организация безопасных нерегулируемых пешеходных переходов на основе средств современных информационных технологий	44
НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПТИКЕ	
Архипов С.А. Термостабильность оптико-электронной съёмочной аппаратуры дистанционного зондирования Земли. Часть IV	47
Седов М. Е. Синтез и обработка фотореалистичных изображений космических объектов	70
Дробот А.С., Абрамшин В.В., Давиденко В.П., Гопоненко Е.В. Разработка низкоуровневых телевизионных камер, применяемых в объектах специального назначения	73



СОДЕРЖАНИЕ

(продолжение)

Лучко С.С., Черепов В.Е. Высокоточное измерительное оборудование для контроля линейно-угловых размеров и оптических параметров	75
Трясов Ю.А., Южик И.Б. Применение цифровых технологий для повышения эксплуатационных свойств приборов для БТТ	77
Колесова А.А., Полесский А.В. Определение требований к качеству оптических поверхностей входных окон специальных неохлаждаемых матричных фотоприемных устройств	82
ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ	
Горшков В.А., Каспарова Е.Г., Корнеев Н.Г., Леонтьев А.А. Технология изготовления мембранно-пневматических элементов для систем разгрузки высокоточной оптики	88
Васильева Е.Ю., Горшков В.А., Щенникова Т.И., Морозова А.В. Технология изготовления и контроля асферических линз преобразователя лазерного излучения	93
Гулюкин М.Н., Елисеев Е.К., Золиков А.В., Игнатов А.Н., Крехова Е.Ю., Никонов А.Б., Рыськов В.С., Храмогин Д.А. Развитие автоматизированного управления процессами варки оптических и специальных технических стекол	100
ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ	
Алехнович В.И., Мельников Д.М., Якимова М.А. Устройство для анализа состава жидких нефтепродуктов	107
Дьякова И.И. Способ нанесения просветляющего многослойного широкополосного покрытия на поверхность оптического стекла	110
Абдулкадыров М.А., Белоусов С.П., Заломленков А.И., Игнатов А.Н., Патрикеев А.П., Патрикеев В.Е., Судариков И.Н., Шаров Ю.А. Использование станков непрерывной полировки при изготовлении оптических деталей	115
Алехнович В.И., Мельников Д.М., Якимова М.А. Криоскопический-нефелометрический метод анализа коллоидов	120
ИНФОРМАЦИЯ	
Всероссийская научно-техническая конференция «Инновационные проекты в оптико-электронном приборостроении»	123
Киселев И.И., Майков Б.П., Тарасов А.П. Прицелы для стрелкового оружия разработки КМЗ	124
Поздравление Бурскому Вячеславу Александровичу	132
Памяти Белозёрова Альберта Фёдоровича	133



**научно-практическая конференция
научной роты
космических войск
воздушно-космических сил**

**«Актуальные вопросы развития вооружений, военной
и специальной техники войск противовоздушной
и противоракетной обороны
Космических войск Воздушно-Космических Сил»**

Конференция проходила на базе МГТУ им. Н.Э.Баумана

**Ежегодные научно-практические конференции операторов
3-й научной роты Космических войск проводятся на базе Научно-
технического центра ПАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева»
с участием членов Общественной научно-технической академии
«Контенант» в области оптических наук,
Московского государственного технического университета
им. Н.Э. Баумана, заведений и организаций МО РФ.
Научно-исследовательская деятельность операторов научных рот
является важным элементом их становления, как высоко
квалифицированных специалистов, так и будущих офицеров.
Высший уровень теоретической подготовки операторов, полученный
в ведущих ВУЗах страны, подкрепленный практическими знаниями,
полученными в процессе прохождения службы на базе
Научно-технического центра «Красногорского завода им. С.А.Зверева»,
неоднократно отмечался медалями и грамотами престижных
научных конференций и выставок.
Успехов в участии в Международном военно-техническом форуме
«Армия-2016».**



**общественная
научно-техническая академия
«КОНТЕНАНТ»**

ПРЕИМУЩЕСТВА И КЛАССИФИКАЦИЯ СТАТИЧЕСКИХ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРОВ

СКЛЯРОВ Э.Э. - ефрейтор, старший оператор 3-ей научной роты



Скляров Э.Э.

В статье приведена классификация наиболее перспективных конструкций статических Фурье-спектрометров, основанная на сравнении способов технической реализации интерференционного блока, а также пространственного разрешения. Рассмотрены вопросы формирования оптических схем для различных режимов сканирования пространства, реализуемых в статических Фурье-спектрометрах.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спектр, статический Фурье-спектрометр, интерферометр Майкельсона, интерферометр Саньяка, интерференция, выигрыш Фелжета.

ВВЕДЕНИЕ

В различных областях контроля для анализа химических веществ широко используются спектральные приборы, которые позволяют в короткие сроки произвести их идентификацию на безопасных расстояниях. Зачастую ставится задача анализа небольших концентраций химических веществ в отсутствии лабораторных условий. При этом важными параметрами являются: **время проведения анализа, стабильность и надежность работы**, а также **компактность габаритов** систем, позволяющих проводить спектральные измерения.

Развитие приборов, предназначенных для спектрального анализа направлено в сторону увеличения таких параметров, как отношение сигнал/шум и количество информации, получаемое за единичный отрезок времени. При этом важно соблюдение условия сохранения или уменьшения массогабаритных характеристик разрабатываемых приборов относительно существующих. Наиболее простыми в изготовлении являются спектрометры построенные на основе дифракционной решетки. Они обладают достаточно большим спектральным разрешением и компактными размерами. Однако её использование ведет к существенным потерям по светосиле,

что неизбежно приводит к использованию источников с большой выходной мощностью излучения, что негативно сказывается на процессе регистрации веществ со слабым люминесцентным излучением. Фурье-спектрометры обладают большей светосилой по сравнению с вышеописанными приборами, а также обладают рядом других примечательных особенностей, таких как: одновременная регистрация всех спектральных интервалов и высокая разрешающая способность [1, 2].

КЛАССИФИКАЦИЯ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРОВ

Фурье-спектрометр – прибор, в котором получение спектров анализируемого вещества происходит в 2 этапа: сначала регистрируется его интерферограмма, а затем, при помощи быстрого Фурье-преобразования вычисляется спектр [3].

В настоящее время развитие Фурье-спектрометров осуществляется в двух направлениях. Различие между ними заключается в конструктивных особенностях проектирования.

Первая, наиболее «закоренелая» ветвь – это **динамические Фурье-спектрометры**, создаваемые на основе интерферометра Майкельсона. В таких приборах оптическая разность хода лучей, формирующая развертку интерферограммы во времени, меняется за

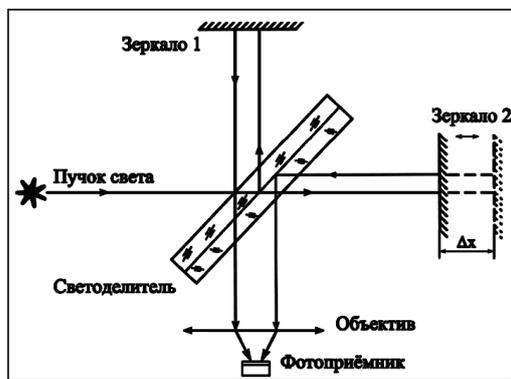


Рисунок 1.

Схема устройства интерферометра Майкельсона [2],
 Δx – смещение зеркала 2

счет изменения положения одного из зеркал – Δx (рис. 1), а сигнал регистрируется одноэлементным фотоприёмным устройством (ФПУ).

Появление многоэлементных ФПУ позволило избавиться от необходимости использования в схеме электромеханических приводов зеркал, что способствовало созданию и развитию **статических Фурье-спектрометров (СФС)**, обладающих **меньшими габаритами**, а также **большой стойкостью к вибрационным и температурным воздействиям**, чем их предшественники. Ключевой особенностью СФС является то, что изменение разности хода лучей осуществляется не во времени, а в пространстве. Многоэлементные ФПУ устройства, используемые для считывания сигнала, позволили добиться **выигрыша в быстродействии и точности измерений** в \sqrt{M} раз, поскольку теперь каждый участок спектра измеряется не один, а M раз (выигрыш Фелжета) [4].

ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМ СТАТИЧЕСКИХ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРОВ

Множество существующих вариантов построения схем статических Фурье-спектрометров различны в основном методами получения когерентных волн, но обладают единым принципом работы: пучок света разделяется в пространстве на пару когерентных пучков, проходящих различные пути внутри оптической схемы, а затем собирающихся в

интерференционную картину на выходной плоскости при помощи проекционного объектива (рис. 1).

Расположение максимумов и минимумов на интерференционной картине, а также их взаимоположение зависит от способа образования когерентных лучей при разделении пучка, количества интерферирующих пучков и разности хода между ними, а также параметров источника света и спектрального состава излучения [5, 6].

Ниже описываются несколько основных категорий охватывающих известные схемы построения статических Фурье-спектрометров [7,8]:

1. Фурье-спектрометры, в основе которых используются двулучепреломляющие кристаллы (поляризационные спектрометры);
2. Интерферометры с обратным круговым ходом лучей (интерферометр Саньяка, Маха-Цендера);
3. Интерферометры на основе явления интерференции в клине, статический интерферометр Майкельсона.

Все они обладают рядом достоинств, таких как: высокая светосила, нечувствительность к рассеянному свету, высокое быстродействие, устойчивость к механическим колебаниям.

Поляризационные спектрометры имеют преимущество с точки зрения технологической эстетичности их конструкции, так как могут быть спроектированы так, что все компоненты будут расположены на одной оптической оси (рис. 2-3) [9].

Такие конструкции позволяют создать компактную систему, однако обладают рядом недостатков: сильной зависимостью степени поляризации от угла падения и длины световой волны, малым телесным углом падающего излучения, ограничением по разрешающей способности, малой оптической эффективностью для поляризованного излучения, многокомпонентностью, а также присутствием проблем с поляризаторами (за пределами $\Delta\lambda=0,4-0,8$ мкм.). Минимизировать и устранить некоторые из них можно, например, путем модификации «классической» схемы (а),

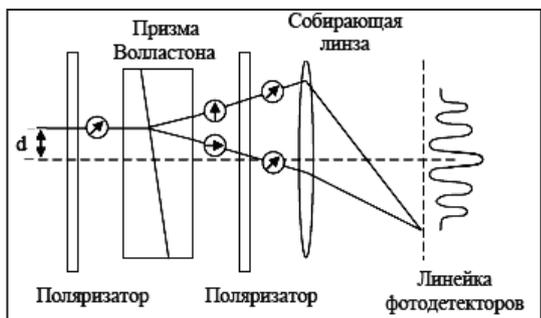


Рисунок 2.

Схема поляризационного спектрометра с использованием призмы Волластона

используя вторую поляризационную призму (рис. 4) [10].

В такой системе отсутствует и необходимость использования собирающей оптики, что позволяет уменьшить размер системы в несколько раз. Недостатком схемы является сильная зависимость степени поляризации от угла падения и длины световой волны.

Вторая концепция – построение Фурье-спектрометра на основе **интерферометра с обратным круговым ходом лучей** – Саньяка, в котором используются неподвижно закреплённые зеркала. Сдвиг между прошедшим и преломленным лучами в такой конструкции происходит в перпендикулярной оптической оси интерферометра плоскости (рис. 5) [11-13].

К недостатку данной схемы можно отнести чувствительность прибора к небольшим разъюстировкам зеркал, которые могут повлечь почти полное исчезновение интерференционной картины.

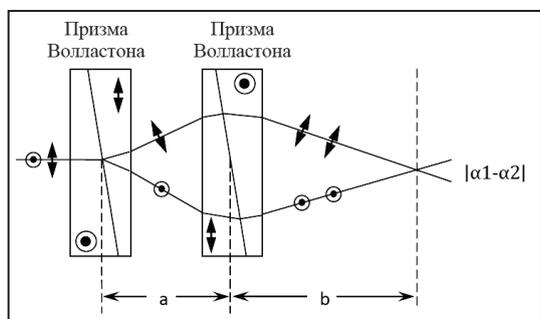


Рисунок 4.

Схема поляризационного спектрометра с использованием двух призм Волластона [2]

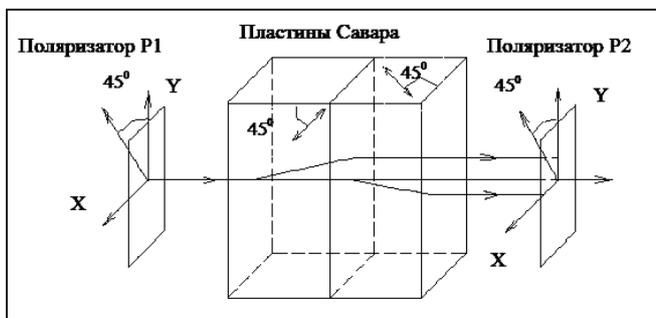


Рисунок 3.

Схема поляризационного спектрометра с использованием пластин Савара

Решить проблему разъюстировки зеркал в интерферометре Саньяка и тем самым уменьшить количество компонент схемы интерферометра, добившись почти полной «монолитности» конструкции можно при использовании склеек двух полу-призм с зеркальными гранями (рис. 6).

Простота конструкции обеспечивает дешевизну и стабильность системы, позволяя сохранить такой же ход лучей, как и в предыдущей схеме интерферометра Саньяка. Такие Фурье-спектрометры обладают высокой чувствительностью, необходимой для регистрации слабо люминесцирующих веществ на расстоянии. Помимо перечисленных преимуществ, для интерферометров-склеек Саньяка отсутствует ограничение по рабочим углам, но их большую светосилу трудно реализовать из-за возникающего виньетирования наклонных пучков [7].

Аналогичными характеристиками обла-

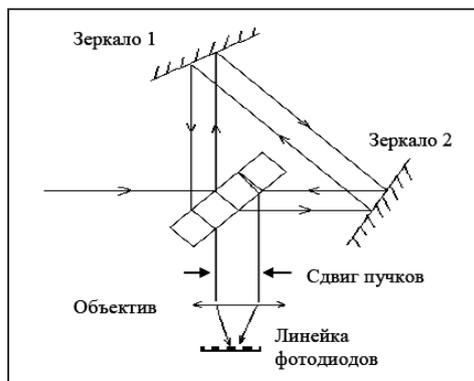


Рисунок 5.

Схема интерферометра Саньяка [2]

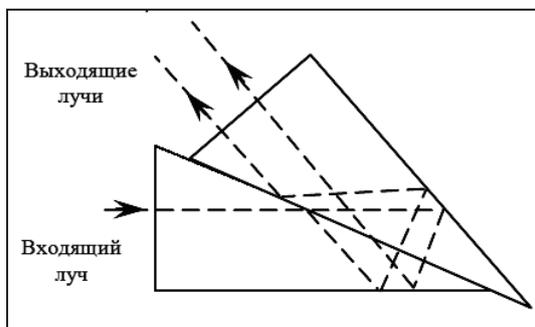


Рисунок 6.

Схема конструкции интерферометра, состоящей из склеенных призм [2]

дают **интерферометры на основе явления интерференции в клине**. В качестве основного элемента данных спектрометров используется интерференционный кубик (рис. 7). [14-15]. С предыдущей категорией эти интерферометры объединяет то, что конечные параметры системы и условия её эксплуатации существенно зависят от выбора материала для изготовления призм, светоотражающих материалов, а также качества клеевой прослойки.

Очевидно, существует достаточно много решений для построения схем статических Фурье-спектрометров. Выбор определенной схемы, её компонент, их размеров и иных нюансов конструкции зависит от конечной цели, преследуемой при создании спектрометра, однако, самым острым вопросом развития методов химического анализа атмосферы является обеспечение качественной работы устройства в условиях неблагоприятного влияния окружающей среды. Выбор статических монолитных конструкций позволяет максимально улучшить показатели устойчивости и надежности приборов, тем самым увеличив срок эксплуатации, а также оказать положительное влияние на качество получаемой информации.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПО СПОСОБУ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Помимо классификации Фурье-спектрометров по принципу применяемых конструктивных особенностей, влияющих на обеспечение хода лучей в схеме, существует

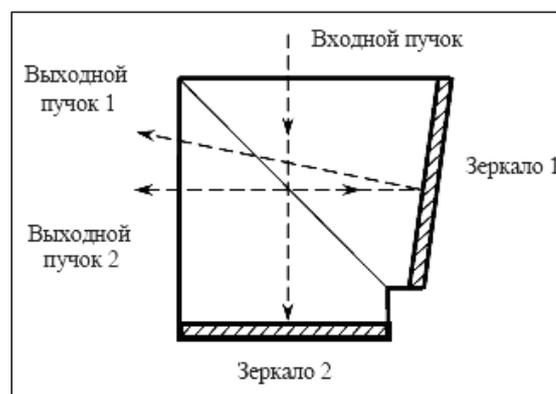


Рисунок 7.

Схема светоделительного кубика [2]

классификация, которая учитывает способы реализации пространственного разрешения. Таким образом известные спектрометры могут быть разделены на группы, использующие следующие типы сканирования пространства (Рис. 8) [16]:

1. Щелевой (Pushbroom) – сканирование по пространству происходит с помощью одномерного мгновенного поля зрения, которое перемещается только в одном направлении, обычно – вдоль траектории носителя;

2. Кадровый (Framing) – спектрометры этого типа используют двухмерное мгновенное поле зрения, которое сохраняется фиксированным (за счет тангажного отслеживания), в течение процедуры сбора данных;

3. Оконный (Windowing) – новый класс гиперспектрометров, в которых двухмерное мгновенное поле зрения движется непрерывным образом вдоль траектории носителя.

В щелевом режиме (рис. 8(1)) непосредственно регистрируются две координаты – спектральная и одна из координат пространства предметов. Вторая пространственная координата кадра регистрируется последовательно в процессе перемещения изображения сцены поперек ширины щели прибора.

При использовании оконного режима (рис. 8(3)) обе пространственные координаты регистрируются непосредственно с помощью строк и столбцов матрицы, а для формирования третьей – спектральной координаты куба каждый точечный объект должен переместиться вдоль строки матрицы от её начала и до конца.

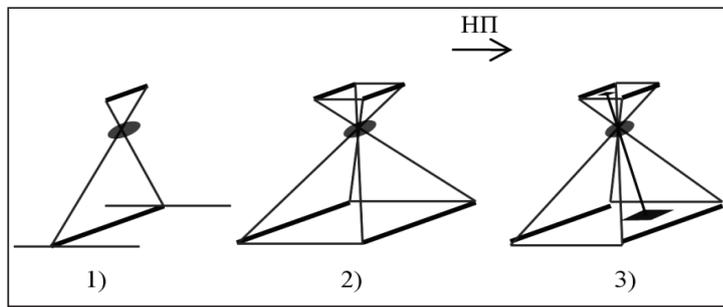


Рисунок 8.

Схематическое изображение способов реализации пространственного разрешения в ФС.

1 - щелевой; 2 - кадровый; 3 - оконный;

НП - направление полёта платформы-носителя [16]

Кадровый режим (рис. 8(2)) в настоящее время практически не находит применения при создании новых приборов, по причине того, что не может обеспечить приемлемую скорость получения информации, а также съемку непрерывного изображения произвольной длины.

Что касается конструирования схем приборов, работающих перечисленными способами, то в щелевом и оконном режимах можно использовать один и тот же тип интерференционного модуля, но при этом оптические схемы, принципы формирования куба данных и другие свойства спектрометров будут существенно различаться (рис. 9-10).

Для наглядности (рис. 9) приведём возможные схемы работы статического Фурье-спектрометра в щелевом и оконном режимах. Для щелевого режима работы схемы представлены в меридиональном и сагиттальном сечениях. Изображение сцены строится в задней фокальной плоскости питающей оптики (1). Здесь же помещается щель (2) шириной b и высотой h . Ширина щели определяет разрешение на местности, а высота щели ориентирована перпендикулярно направлению смещения носителя и определяет ширину захвата. Далее в расходящемся пучке установлен двухлучевой интерферометр какого-либо типа (3), обеспечивающий поперечное расщепление интерферирующих лучей (сдвиг) на величину T . Параллельные когерентные пучки лучей падают на Фурье-объектив (4) и интерферируют в его задней фокальной плоскости (6), где устанавливается матричное фотоприемное устройство (ФПУ). По стро-

кам матрицы размещается интерферограмма – функция автокорреляции спектра входящего излучения. Позади Фурье-объектива находится цилиндрическая линза (5), которая в меридиональном сечении эквивалентна плоскопараллельной пластинке и в первом приближении не влияет на ход лучей. Однако, в сагиттальном сечении оптическая сила цилиндрической линзы суммируется с оптической силой Фурье-объектива таким образом, чтобы построить изображение высоты h входной щели (2) на столбцах матричного ФПУ. При единичном линейном увеличении в схеме размеры пикселей определяют ширину щели, пространственное разрешение по обеим координатам, а в зависимости от количества пикселей в столбцах – и реальную ширину захвата. Принцип регистрации спектральной координаты и координат пространства предметов для данного режима был описан выше.

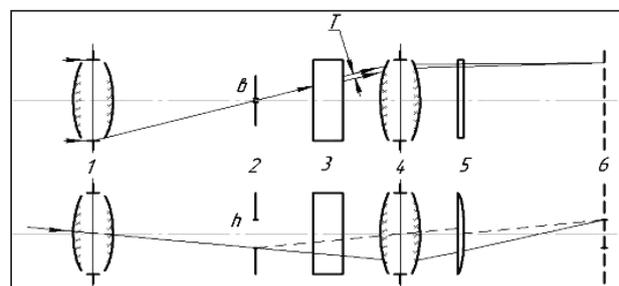


Рисунок 9.

Оптическая схема щелевого режима:

1 – изображающая оптика; 2 – щель с шириной b и высотой h ; 3 – двухлучевой интерферометр; 4 – фурье-объектив; 5 – цилиндрическая линза; 6 – плоскость ФПУ

На рис. 10 приведена схема работы СФС в режиме оконного сканирования. Отличия от схемы, изображенной на рис. 9 состоят в отсутствии щели на входе и цилиндрической линзы после Фурье-объектива.

Показанная на рис. 10 прямоугольная диафрагма (2) со сторонами $h = b$ может отсутствовать, поскольку размеры поля реально определяются матрицей ФПУ. Дополнительный объектив (3) коллимирует излучение, интерферометр (4) вносит сдвиг T , а Фурье-объектив (5) строит изображение сцены в плоскости ФПУ и формирует там же интерференционную картину полос равного наклона. Таким образом, обе пространственные координаты регистрируются непосредственно с помощью строк и столбцов матрицы, а для формирования третьей – спектральной координаты куба каждый точечный объект должен переместиться вдоль строки матрицы от начала ее и до конца. При этом каждый пиксел соответствует строго определенному значению разности хода, поэтому яркость объекта при смещении вдоль строки оказывается косинусоидально промодулированной, как и в любой другой интерферограмме, регистрируемой Фурье-спектрометром.

Были изучены данные работ зарубежных исследователей о сравнении спектрометров с различной реализацией способов сканирования по отношению сигнал/шум. В ходе существующих сравнений предполагались одинаковыми: спектральный диапазон, количество спектральных выборок, количество пространственных выборок поперек и вдоль

трека, а также полное время на получение информации. С учетом вышесказанного были получены расчетные формулы для величины сигналов при условии отсутствия шумов, а результаты вычислений показали существенные преимущества интерференционных приборов, работающих без входной щели и без цилиндрической линзы (оконный режим). Расчетные формулы и выходные данные не рассматриваются в рамках данной статьи с целью сужения масштабов информационного поля.

Явное преимущество использования оконного режима также видно из сравнения светосилы СФС, например, на основе интерферометра Саньяка, а точнее – при сравнении значения геометрического фактора (ωS), где ω – телесный угол входного отверстия, а S – площадь параллельного пучка лучей (площадь зрачка). Находим отношение геометрических факторов двух режимов сканирования:

$$\frac{S\omega_{\text{оконный}}}{S\omega_{\text{щелевой}}} = \frac{4\pi(D/F)^2 S_{\text{матрицы}}}{4\pi(D/F)^2 bh} = \frac{S_{\text{матрицы}}}{S_{\text{столбца}}} = N,$$

где N – количество столбцов матрицы, D/F – относительное отверстие входного объектива СФС.

Сравнение данных режимов сканирования по пространству нельзя назвать полным, не упомянув о существенном различии значений времени экспозиции в процессе сбора данных. Время сбора интерферограммы за время перемещения космического аппарата на один пространственный разрешаемый интервал при использовании щелевого ре-

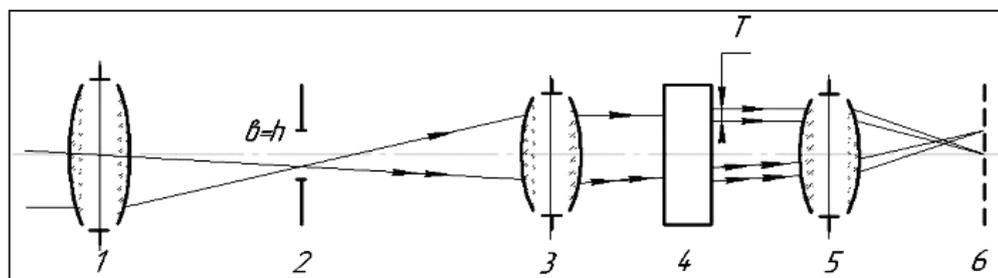


Рисунок 10.

Оптическая схема оконного режима:

1 – изображающая оптика; 2 – прямоугольная диафрагма; 3 – коллимационный объектив; 4 – двухлучевой интерферометр; 5 – фурье-объектив; 6 – плоскость ФПУ

жима фиксировано и равно приблизительно 4.3 мсек, в то время как для оконного режима время сбора данных определяется временем «проплывания» сцены мимо «окна» – матрицы. Для ширины матрицы $N=1024$ время сбора данных составляет примерно 4.4 секунды. Общий выигрыш оконного режима в отношении сигнал/шум можно ожидать на уровне $= N$, что говорит о выигрыше порядка в тысячу раз для ФПУ 1024 x 1024 пикселей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статические Фурье-спектрометры за время своего развития превратились в один из основных перспективных инструментов, позволяющих осуществлять качественный спектральный анализ вещества. В рамках статьи рассмотрены основные модификации существующих статических Фурье-спектрометров, оптические схемы, конструктивные решения. В настоящее время повсеместно идут работы по развитию и совершенствованию данного класса приборов, а также способов получения спектральной информации с их помощью. Всё это говорит о чрезвычайной полезности и уникальности статических Фурье-спектрометров наряду с их простотой и надежностью. В данной статье рассмотрены категории построения схем статических Фурье-спектрометров, основанные на методах получения когерентных волн и применении интерференционных блоков различного типа. Помимо этого приведена классификация наиболее популярных способов реализации пространственного разрешения в таких приборах с представлением элементарных сравнений и определением наиболее оптимальных оптических схем для их построения.

Список литературы:

1. Горбунов Г.Г. Методы и приборы Фурье-спектрометрии космического базирования: дис. докт. техн. наук: 01.04.05 / Горбунов Георгий Георгиевич. – С., 2002. – 178 с.
2. Голяк И.С. Применение статического Фурье-спектрометра для беспроботборного анализа химических соединений: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.01 / Голяк Илья Семенович. – М., 2015. – 140 с.
3. Стюард И. Г. Введение в фурье оптику. М.: Мир, 1985. – 182 с.
4. Портативный фурье-спектрометр с не-

охлаждаемым фотоприемником / С. К. Дворук [и др.] // Оптический журнал. – 2006. – Т. 73. – № 11. – С. 67-72.

5. Белл Р. Дж. Введение в фурье спектроскопию. М.: Мир, 1975. – 380 с.

6. Висковатых, А. В. Разработка и исследование аналитических Фурье-спектрометров: дис. канд. техн. наук: 01.04.01 / Висковатых Александр Владимирович. – М., 2005. – 125 с.

7. Морозов А.Н., Светличный С.И. Основы фурье-спектрометрии. М.: Наука, 2006. – 275 с.

8. Статический фурье-спектрометр видимого диапазона / Ил. С. Голяк [и др.] // Известия РАН, Энергетика. – 2010. – № 2. – с. 12-21.

9. Padgett M. J., Harvey A. R., Duncan A. J., Sibbett W. Single-pulse, Fourier-transform spectrometer having no moving parts // Applied Optics. – 1994. – V. 33. – №. 25. – P. 6035-6040.

10. Padgett M. J., Harvey A. R. A static Fourier-transform spectrometer based on Wollaston prisms // Review of Scientific Instruments. – 1995. – V. 66. – № 4. – P. 2807 - 2811.

11. Егорова Л. В., Ермакова Д. С., Кувалкин Д.Г. и др. Малогабаритный статический Фурье-спектрометр видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра // ПТЭ. – 1992. – № 2. – С. 208-209.

12. Бурмасов В. С., Князев Б. А., Любас Г. А., Федотов М. Г. Статический фурье спектрометр на базе персонального компьютера с регистрацией фотодиодной линейкой // Препринт. Новосибирский университет. – 1992. – 10 с.

13. A. Barducci [and oth.] The aerospace imaging interferometer Aliseo: further improvements of calibration methods and assessment of interferometer response // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2008. – V. 37. – P. 935-940.

14. Бирюлева В. И., Бушев Ю. А., Гершун М. А., Егорова Л. В. Приспособление для склейки светоделительного кубика // ОМП.– 1983.– № 11. – С. 52-53.

15. Белаш, А. О. Разработка оборудования для экспресс-анализа концентраций примесей в полупроводниковых материалах методом статической фурье-спектроскопии: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.06 / Белаш Александр Олегович. – СПб., 2012. –173 с.

16. Архипов С.А. [и др.] Выбор схемного решения гиперспектральной съемочной оптико-электронной аппаратуры для КА // Презентация – М., 2008. – 10 с.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОМАХА ДЛЯ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СРЕДСТВ САМОНАВЕДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ

МАСЛИКОВ В.Н. - рядовой, оператор 3-ей научной роты



Масликов В.Н.

В настоящее время актуальной задачей является создание многоцветной и «неубиваемой» мишени, позволяющей проводить испытания противоспутникового и противоракетного оружия на внеатмосферном участке траектории. В данной статье предоставлены основные принципы мишени и разработанных методов испытаний.

Ключевые слова: актуальность задачи создания мишеней, принципы построения, цели создания макета, порядок создания макета, испытания.

О МИШЕНИ

В настоящее время актуальной задачей является создание многоцветной и «неубиваемой» мишени, позволяющей проводить испытания противоспутникового и противоракетного оружия на внеатмосферном участке траектории. В настоящее время в России такой мишени нет. Решение этой задачи позволит следующее:

- осуществить неоднократное испытание кинетического оружия в космосе;
- осуществить набор статистики промаха;
- ввести в заблуждение вероятного противника о точностных характеристиках российского оружия;
- избежать засорения ближнего космоса;
- избежать дипломатических скандалов.

Пример испытания кинематического оружия Китаем путем поражения устаревшего спутника привел к существенному засорению ближнего космоса осколками и дипломатическим скандалам. Применение безосколочных (надувных) мишеней дает возможность зафиксировать только факт попадания и не позволяет оценить величину промаха. К тому же эти мишени одноразовые, так как не могут существовать в космосе более одного витка.

Основной трудностью создания мишени является большая скорость сближения перехватчика с мишенью – до 5000 м/сек.

Способ измерения промаха по типу «обнаружил – захватил – сопровождал – измерил» является излишним. Надо решать только задачу «обнаружил-измерил».

Для решения этой задачи предлагается следующее:

- мишень делается на базе стандартной ориентированной космической платформы;
- мишень делается по типу «веерного заслона», в которой несколько лазерных дальномеров создают сплошное поле в плоскости, перпендикулярной продольной оси космической платформы. В этом случае нет необходимости дальнего обнаружения и сопровождения перехватчика. Достаточно зафиксировать координаты точки пересечения перехватчиком контролируемой дальномерами плоскости.

При этом для создания «неубиваемой» и «долгоиграющей» мишени необходимо на перехватчике в процессе испытаний сместить точку прицеливания на 50-100 м.

Предварительные расчеты показали, что в качестве дальномеров в такой «веерной» мишени могут быть использованы полупроводниковые лазерные дальнометры (НИИ «Полюс»). Для проверки данного технического решения необходимо:

- создание макета лазерной мишени;
- создание оборудования для лабораторной и полигонной апробации макета.

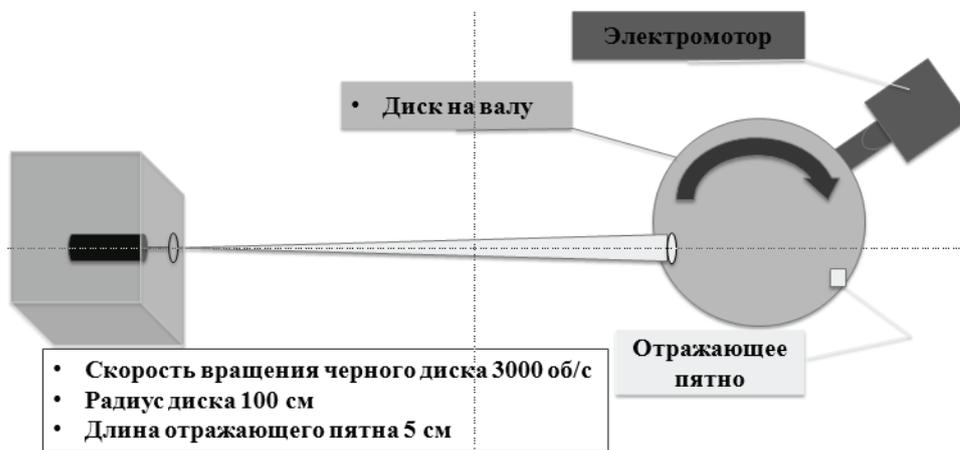


Рисунок 1.
Макет лабораторных испытаний быстродействия дальномера

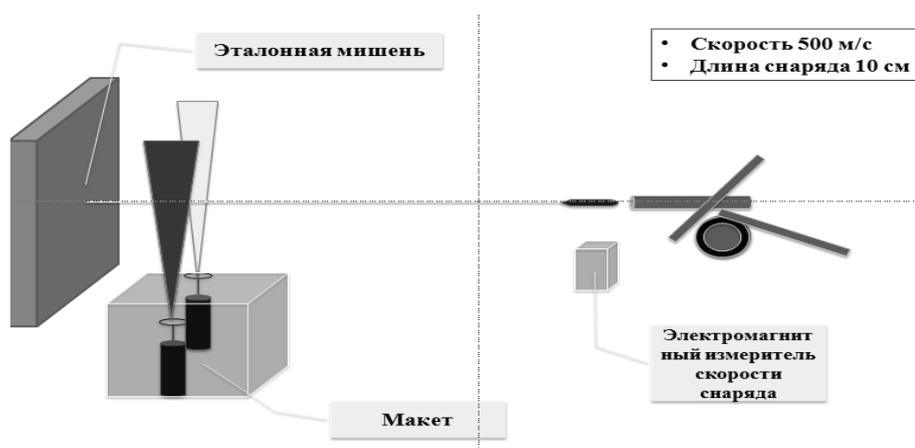


Рисунок 2.
Макет полигонных испытаний макета

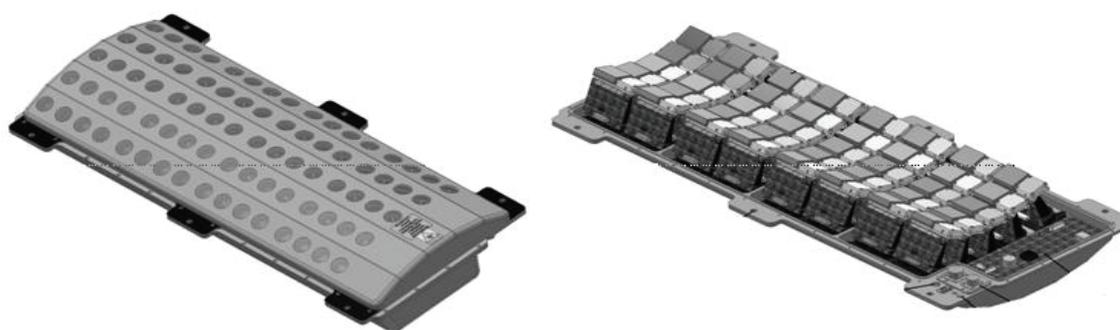


Рисунок 3.
Макет НИИ «Полюс» из 40 дальномеров для крылатой ракеты

Цель создания макета:

- проверка теоретических данных о возможности проведения высокоскоростных измерений дальности при кратковременном (0.0002с) контакте с объектом;
- исследование характеристик дальномера при различных диаграммах излучения;
- выбор диаграммы излучателя;
- проверка выбора типа лазера;
- отработка аппаратуры управления комплектом дальномеров (до 40 шт);
- отработка программного обеспечения комплекта;
- проведение лабораторных испытаний макета;
- проведение полигонных испытаний макета;
- проведение метрологической поверки комплекта дальномеров;
- отработка вопросов выбора и стыковки комплекта с космической платформой.

ИСПЫТАНИЯ

В качестве основы многократной мишени целесообразно использовать универсальную космическую платформу, которые выпускаются рядом Российских предприятий (РКК «Энергия» им. С.П. Королева, ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, АО «ГРЦ имени ака-

демиды В.П. Макеева» и другими). При выборе платформы следует учесть следующие требования:

- время работы на орбите не менее трех лет;
- наличие систем ориентации, стабилизации, телеметрии;
- наличие свободной мощности не менее 500 Вт;
- возможность установки оборудования общим весом до 50 кг.

Если будет выбрана достаточно мощная платформа, то ее можно будет дооснастить кассетами КСП ПРО. В этом случае можно отстреливать кассету до проведения запуска перехватчика и оценить работу систем селекции и наведения перехватчика путем измерения данных промаха и фотографирования элементов КСП после его пролета мимо мишени.

В качестве примера лазерной части макета мишени можно привести макет лазерной «гребенки», разработанной НПО «Полус» в процессе создания элементов российского Томагавка.

Использование подобных систем испытаний позволит достичь результатов необходимой точности.

СИНТЕЗ РЕЛЕЙНОГО ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА МЕТОДОМ УЧЁТА МАЛЫХ ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ

КОРОБКО С.Д. - рядовой, оператор 3-ей научной роты



Коробко С.Д.

Рассматривается алгоритм синтеза релейного закона управления силовым гидроприводом на основе метода учёта малых постоянных времени.

Ключевые слова: гидропривод, фазовый годограф, конечномерная оптимизация, эквивалентное запаздывание.

В настоящее время при проектировании управляемых комплексов вооружения одной из основных задач является создание высокоточных систем слежения. В качестве следящей системы широко используются силовые гидроприводы с объёмным регулированием скорости.

Синтез гидравлического привода с объёмным регулированием скорости предлагается выполнять поэтапно. На начальном этапе из полной математической модели гидропривода выделяется базовая модель 4-ого порядка, в которой приравнены к нулю малые постоянные времени, а также не учитывается жёсткость механической передачи и люфт в редукторе.

Здесь γ - угол поворота люльки насоса переменной производительности; p - давление масла в магистрали; ω - угловая скорость гидромотора; φ - угол поворота нагрузки; q - коэффициент передачи редуктора. На представленном выше рисунке не указаны прису-

щие гидроприводу с объёмным регулированием скорости ограничители, т.к. в режиме слежения они не достигаются.

Синтез системы гидропривода следует рассматривать как задачу конечномерной оптимизации. В качестве критерия оптимизации будем использовать критерий качества $Q(K_1, K_2, \dots, K_n) = \max \varepsilon(t) \rightarrow \min$ [1]. Здесь K_1, K_2, \dots, K_n - коэффициенты обратных связей по фазовым координатам γ, p, ω . Также главная обратная связь по координате $\varphi_{\text{вых}}$ предполагается единичной. В качестве метода конечномерной оптимизации использовался алгоритм поиска оптимальных коэффициентов K_1, K_2, K_3 с «возвратом при неудачном шаге». При оптимальном поиске использовался метод фазового годографа, благодаря которому определялась частота, возникающих в системы, автоколебаний [2]. Данный критерий оптимизации обеспечивался с помощью моделирования динамики системы на ЦВМ.

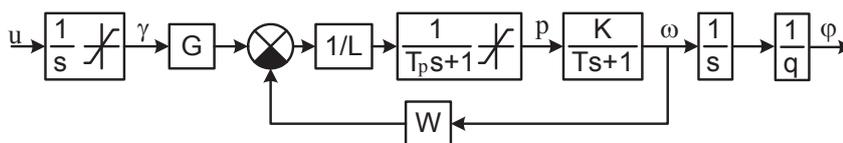


Рисунок 1.

Структурная схема базовой модели гидропривода с объёмным регулированием скорости

Результаты моделирования представлены на рис. 2 и рис. 3.

Как видно из представленных рисунков, синтезированный закон управления обеспечивает высокую точность режима слежения. Ошибка слежения составляет 2,8 мрад.

Далее с помощью метода учёта малых постоянных времени [2] перейдём к закону управления для систем гидропривода более высоких порядков.

Учтём сначала в базовом законе управления влияние малой постоянной времени T_x , получим:

$$u = A \operatorname{sign} \left[y + R \dot{y} - (\varphi + \dot{\varphi} \tau_6) - K_1 (\gamma + \dot{\gamma} \tau_6) - K_2 (p + \dot{p} \tau_6) - K_3 (\omega + \dot{\omega} \tau_6) \right] \quad (1)$$

где, $A = \alpha_{\max}$; y - входной сигнал; τ_6 - некоторое «эквивалентное запаздывание»

$$R = C_1 q \left(\frac{L}{GK} + \frac{W}{G} \right) + q \left(\frac{C_2}{K} + C_3 \right)$$

В соответствии со структурной схемой

$$\dot{\varphi} = \frac{1}{q} \omega; \quad \dot{\omega} = \frac{1}{T} (Kp - \omega); \quad \dot{p} = \frac{1}{T_p} \left[\frac{1}{L} (G\gamma - W\omega) - p \right]; \quad \dot{\gamma} = K_\gamma x.$$

где L - суммарный коэффициент утечек жидкости; W - удельный объем гидронасоса; G - коэффициент усиления насоса регулируемой производительности по расходу

В результате закон управления гидравлического привода для системы пятого порядка принимает вид:

$$u = A \operatorname{sign} \left[y + R \dot{y} - \varphi - \frac{1}{q} \omega \tau_6 - K_1 (\gamma + K_\gamma x \tau_6) - K_2 \left(p + \frac{1}{T_p} \left(\frac{1}{L} (G\gamma - W\omega) - p \right) \tau_6 \right) - K_3 \left(\omega + \frac{1}{T} (Kp - \omega) \tau_6 \right) \right] \quad (2)$$

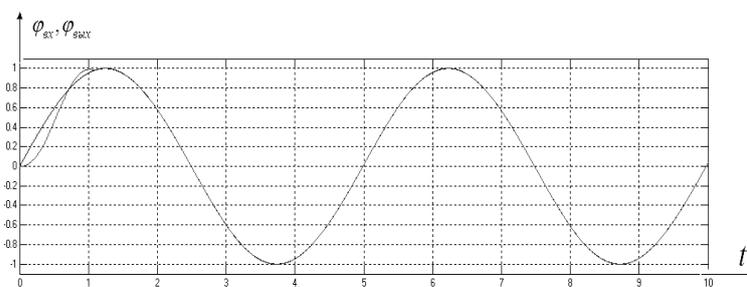


Рисунок 2.

График входного и выходного сигнала базовой системы гидропривода

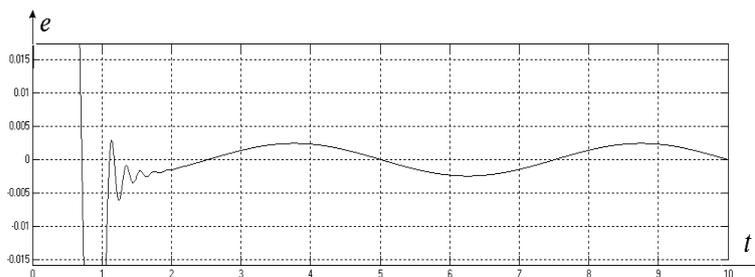


Рисунок 3.

График ошибки слежения базовой системы гидропривода

Для упрощения получаемого закона управления из оставшихся малых постоянных времени будем учитывать только постоянную времени T_i как наиболее существенную. Постоянные времени T_α и T_m будем учитывать косвенно при выборе «эквивалентного запаздывания» τ_7 .

В результате закон управления (1) примет

следующий вид:

$$u = A^* \text{sign}[y + R\dot{y} - \varphi_y - e_1\gamma_y - e_2p_y - e_3\omega_y] \quad (3)$$

В законе управления $A^* = |u_{\max}|$, $\gamma_y, p_y, \omega_y, \varphi_y$ - упрежденные соответственно на τ_6 и τ_7 фазовые переменные. Они задаются равенствами:

$$\begin{cases} \gamma_y = \gamma + K_\gamma x (\tau_6 + \tau_7) + \frac{K_\gamma}{T_x} (K^* i - x) \tau_6 \tau_7; \\ p_y = \left[p + \frac{1}{T_p} \left(\frac{1}{L} (G\gamma - W\omega) - p \right) \tau_7 \right] \left(1 - \frac{\tau_6}{T_p} \right) + \\ + \frac{1}{T_p L} \left[G(\gamma + K_\gamma x \tau_7) - W \left(\omega + \frac{1}{T} (Kp - \omega) \tau_7 \right) \right] \tau_6; \\ \omega_y = \left[\omega + \frac{1}{T} (Kp - \omega) \tau_7 \right] \left(1 - \frac{\tau_6}{T} \right) + \frac{K}{T} \left[p + \frac{1}{T_p} \left(\frac{1}{L} (G\gamma - W\omega) - p \right) \tau_7 \right] \tau_6; \\ \varphi_y = \varphi + \frac{1}{q} \left[\omega (\tau_6 + \tau_7) + \frac{1}{T} (Kp - \omega) \tau_6 \tau_7 \right]; K^* = K_m K_\alpha K_x. \end{cases}$$

«Эквивалентное запаздывание» τ_7 , также как и в предыдущем случае, определяется в процессе компьютерного моделирования системы восьмого порядка.

Далее учитывая нежесткость механической передачи, получаем полную схему гидропривода 10-го порядка. Данная схема представлена на рис. 4.

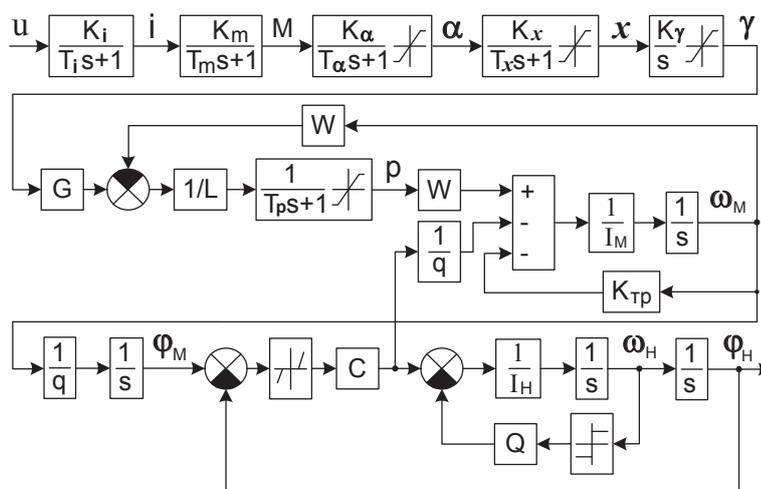


Рисунок 4.

Структурная схема системы гидравлического привода 10-го порядка

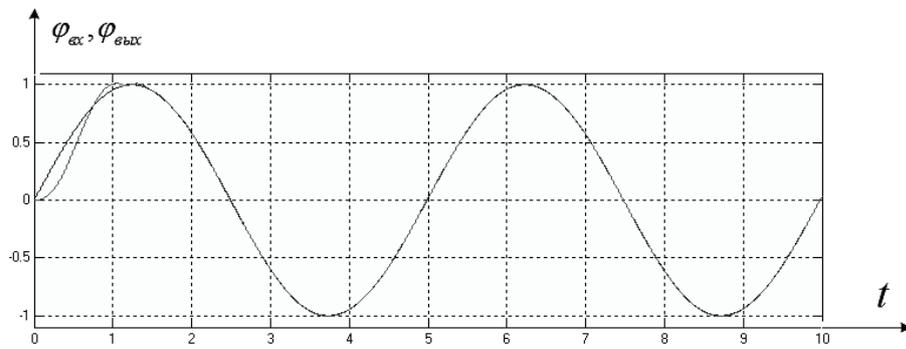


Рисунок 5.
График входного и выходного сигнала системы гидропривода

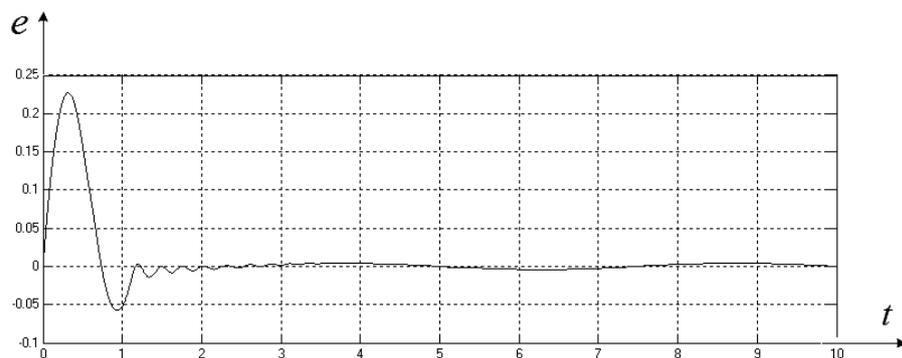


Рисунок 6.
График ошибки слежения системы гидропривода

Проведём моделирование динамики системы для окончательного синтезированного закона управления. Результаты представлены на рисунках 5 и 6.

Из графика видно, что ошибка слежения составляет 2,5 мрад.

С помощью представленного алгоритма синтеза поэтапно решается задача конечномерной оптимизации. Из сравнения графиков на рисунках 3 и 6 можно сделать вывод, что при переходе от базовой модели гидропривода к полной, путём учёта малых постоянных времени, точность режима слежения высокая

и практически не изменяется. Полученное значение ошибки слежения 2,5 мрад удовлетворяет техническим требованиям и является хорошим результатом для рассматриваемого класса гидроприводов.

Список литературы:

1. Пупков К.А., Фалдин Н.В., Егунов Н.Д. Методы синтеза оптимальных систем автоматического управления. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000 г. - 510 с.
2. Фалдин Н.В., Руднев С.А. Оптимизация в конечномерном пространстве. - Тула: ТПИ, 1986 г. - 72 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ В ПАКЕТЕ SIMULINK СИСТЕМЫ MATLAB

ПРОНИН Р.И. - ефрейтор, оператор 3-ей научной роты



Пронин Р.И.

При разработке систем управления в ряде случаев возникает необходимость моделирования такого свойства некоторых реальных объектов, как гистерезис. В статье описывается структура и принцип работы Simulink-блока, позволяющего моделировать гистерезис на основе аналитического описания Чана, приводятся рекомендации по его настройке, а также анализируются результаты моделирования.

Ключевые слова: гистерезис, математическое моделирование, Simulink Matlab, конечный автомат.

ВВЕДЕНИЕ

Известен целый ряд физических процессов, в которых проявляется гистерезис. Примером являются:

- намагничивание ферромагнетиков (магнитный гистерезис);
- поляризация сегнетоэлектриков (сегнетоэлектрический гистерезис);
- деформация упругих материалов (упругий гистерезис).

Элементы с гистерезисным поведением в составе автоматических систем могут оказывать существенное влияние на их работу и устойчивость, так как характеризуются неоднозначностью реакции на входные воздействия. Учет таких свойств при проектировании необходим для предотвращения автоколебаний, повышения точности, а также повышения энергоэффективности, так как явление гистерезиса всегда связано с потерями энергии.

Стандартная библиотека Simulink не содержит модели прямоугольной гистерезисной нелинейности. В данной статье рассматривается построение такого элемента.

В качестве основного инструмента по причине наглядности и удобства отладки используется пакет для построения моделей конечных автоматов StateflowChart, что совершенно не исключает возможности реали-

зации алгоритмов, изложенных ниже через иные инструменты, например S-функции.

Для аналитического описания кривых применяется математическая модель Чана [1]. Во всех выкладках здесь и далее будем использовать нотацию магнитного гистерезиса (\mathbf{B} – для выходного значения функции, \mathbf{H} – для ее аргумента), но данной моделью может быть описан гистерезис любого рода, поэтому выбор конкретных обозначений не принципиален.

ПОЛОЖЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Согласно математической модели Чана форма петли гистерезиса задается следующими параметрами: \mathbf{B}_r – остаточная индукция, \mathbf{B}_s – Индукция насыщения, \mathbf{H}_c – коэрцитивная сила (рис. 1)

Кривые описываются следующими зависимостями.

Верхняя ветвь предельного цикла:

$$B_{up}(H) = B_s \times \frac{H + H_c}{|H + H_c| + H_c \cdot \left(\frac{B_s}{B_r} - 1\right)} + \mu_0 \cdot H \quad (1)$$

Нижняя ветвь предельного цикла:

$$B_{dn}(H) = B_s \times \frac{H - H_c}{|H - H_c| + H_c \cdot \left(\frac{B_s}{B_r} - 1\right)} + \mu_0 \cdot H \quad (2)$$

Начальная кривая:

$$B_{st}(H) = \frac{B_{up}(H) + B_{dn}(H)}{2} \quad (3)$$

Кривые частных циклов строятся следующим образом. Сначала для определения типа кривой рассчитывается значение:

$$B_d(H) = B_{up}(H) - B_{dn}(H) \quad (4)$$

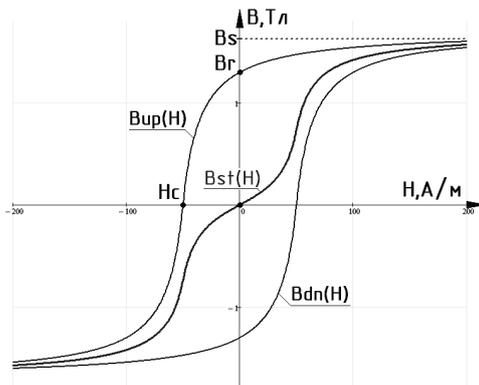


Рисунок 1.

Начальная кривая и ветви предельного цикла петли гистерезиса, описанного с помощью модели Чана

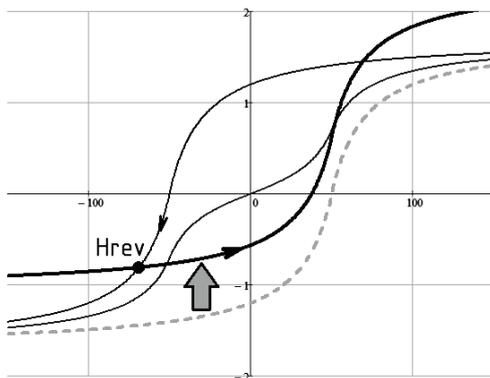


Рисунок 2.

Построение кривой частного цикла в случае $B_d(H_{rev}) < B_r$

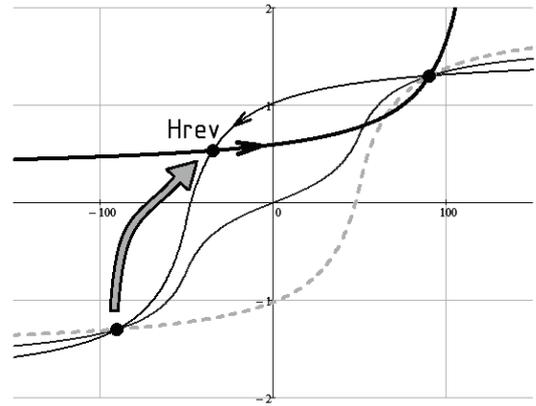


Рисунок 3.

Построение кривой частного цикла в случае $B_d(H_{rev}) > B_r$.

Если в точке реверса (точке, где направление изменения аргумента меняется на противоположное) выполняется $B_d(H_{rev}) < B_r$, то кривая нового цикла получается из соответствующей ветви старого цикла вертикальным смещением на величину B_d (т.е. до совмещения с точкой реверса) (см. рис. 2.)

Если в точке реверса $B_d(H_{rev}) > B_r$, то соответствующая кривая старого цикла смещается так, чтобы ее критическая точка совместились с точкой реверса (см.рис. 3.)

В критическом случае, когда $B_d(H_{rev}) = B_r$ кривые, построенные этими способами, эквивалентны и проходят через начало координат.

Для построения модели дополнительно используется выражение для определения абсцисс точек пересечения кривых частных циклов с начальной кривой (критических точек) по величине их вертикального смещения (для кривых, которые получены вертикальным и горизонтальным смещениями надобность определения критических точек отсутствует.). Абсцисса критической точки, находящейся в первом квадранте:

$$H_{int}(D_y) = \begin{cases} H_c \times \sqrt{\frac{B_r^3 \cdot D_y \cdot (B_s^2 - B_r \cdot B_s + B_r \cdot D_y) + B_r^2 \cdot D_y - B_r \cdot B_s \cdot D_y}{B_r^2 \cdot D_y}}, & D_y \leq B_b \\ \frac{B_s \cdot H_c \cdot \sqrt{D_y^2 + B_r \cdot B_s - B_r \cdot D_y - B_s \cdot D_y}}{B_r \cdot B_s - B_r \cdot D_y}, & D_y > B_b \end{cases} \quad (5) \quad \text{где } B_b = \frac{B_r \cdot B_s}{B_r + B_s}$$

Вторая критическая точка симметрична первой относительно начала координат. Если кривая частного цикла не пересекает начальную кривую, функция дает комплексный результат.

РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ

Рассмотрим структуру и принцип работы конечного автомата, моделирующего гистерезис согласно логике, изложенной выше. Граф переходов представлен на рис. 4.

Структура графа основана на 7 состояниях, смысл которых пояснен в табл. 1. Локальные функции описаны в табл. 2. Переменные используемые для работы описаны в табл. 3.

Приведем описание работы конечного автомата (см. рис. 4). При входе в очередное состояние сначала рассчитываются параметры нового частного цикла **curve**, **Dx**, **Dy**, **Hint**, затем, пока автомат сохраняет состояние, производится вычисление выходного значения **By=fBy(Hx,curve,Dy,Dx)**. В начальный момент времени рабочая точка всегда находится на начальной кривой (состояние **ST0**). Далее при первом изменении знака производной входного сигнала (реверсе первого по-

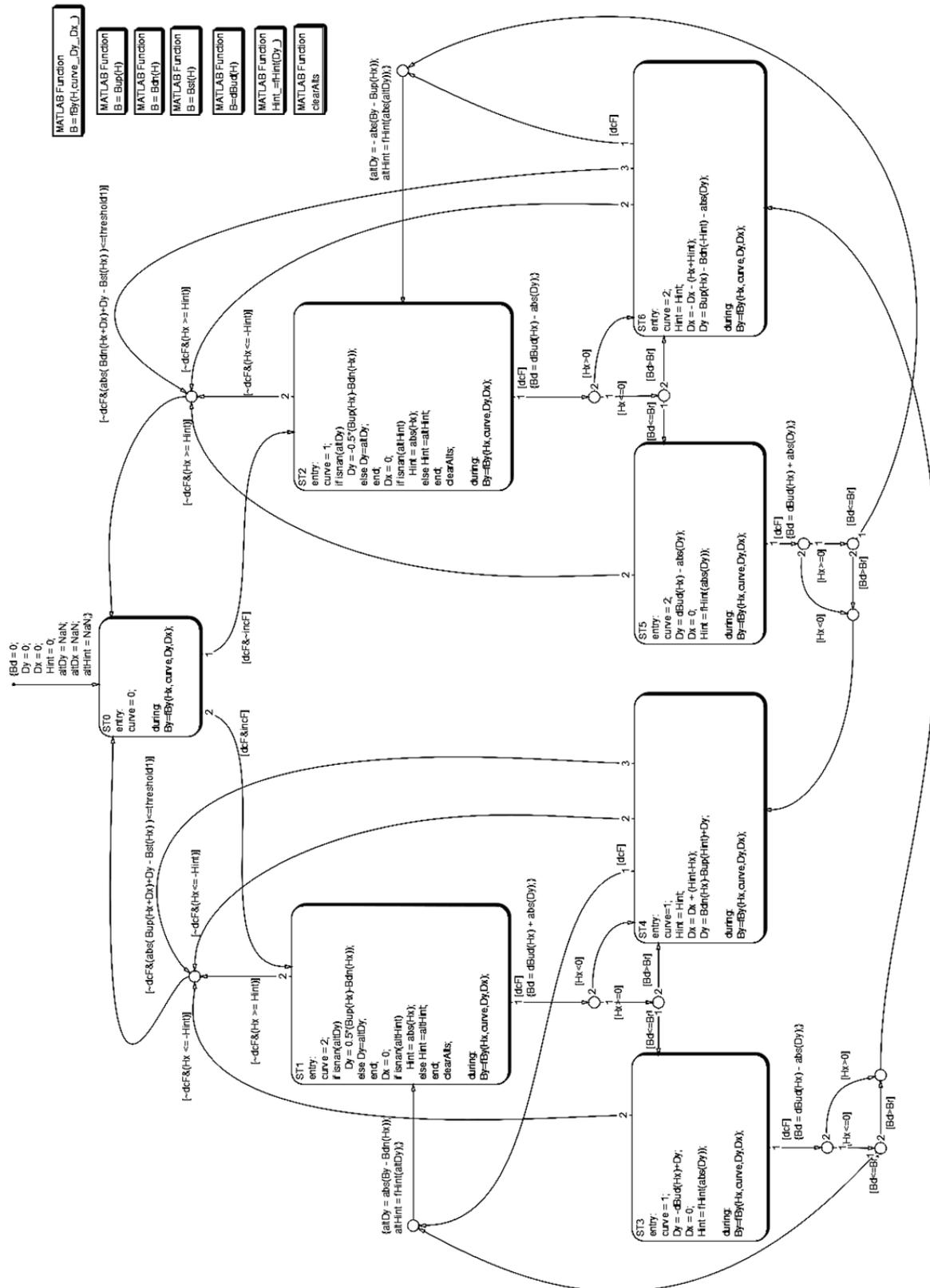
рядка) по флагу **dcF** происходит переключение в состояние **ST1** или **ST2** в зависимости от направления (по флагу **incF**). При входе в состояние рассчитываются параметры нового частного цикла. Далее при очередном реверсе (реверсе второго порядка), в зависимости от знака входного сигнала и отношения **Bd/Br** происходит переключение в состояния **ST3/ST4** (при движении из состояния **ST1**) или **ST5/ST6** (при движении из состояния **ST2**). При реверсе третьего порядка в зависимости от знака входного сигнала и отношения **Bd/Br** происходит переключение в состояния **ST1/ST6** (при движении из состояния **ST3** или **ST4**) или **ST2/ST4** (при движении из состояния **ST5** или **ST6**). Таким образом, круг замыкается, и далее логика работы повторяется. Кроме переходов по смене знака производной входного сигнала возможен переход из любого состояния на начальную кривую (в состоянии **ST0**), если кривая частного цикла пересекает ее в точке (**Hint**; **Bst(Hint)**). Логические условия всех переходов и выражения для расчета параметров очередного частного цикла наглядно представлены на графе (см. рис. 4.)

Таблица 1.

Состояние	Описание (положение рабочей точки)
ST0	на начальной кривой
ST1	на нижней кривой с вертикальным смещением (при реверсе с начальной кривой)
ST2	на верхней кривой с вертикальным смещением (при реверсе с начальной кривой)
ST3	на верхней кривой с вертикальным смещением (при реверсе с нижней кривой другого частного цикла, $B_d(H_{rev}) \leq B_r$)
ST4	на верхней кривой с вертикальным и горизонтальным смещениями (при реверсе с нижней кривой другого частного цикла, $B_d(H_{rev}) > B_r$)
ST5	на нижней кривой с вертикальным смещением (при реверсе с верхней кривой другого частного цикла, $B_d(H_{rev}) \leq B_r$)
ST6	на нижней кривой с вертикальным и горизонтальным смещениями (при реверсе с верхней кривой другого частного цикла, $B_d(H_{rev}) > B_r$)

Таблица 2.

Функция	Описание
Bup(H)	Функция верхней кривой (1)
Bdn(H)	Функция нижней кривой (2)
Bst(H)	Функция начальной кривой (3)
fBy(H,curve_,Dy_,Dx_)	Функция осуществляющая выбор кривой по ключу curve (см.табл.3.): 0 : Bst(H) ; 1 : Bup(H+Dx)+Dy ; 2 : Bdn(H+Dx)+Dy
dBud(H)	Разность по ординате между верхней и нижней кривой (4)
fHint(Dy_)	Функция нахождения положительной абсциссы точки пересечения вертикально-смещенной кривой с начальной кривой (5)
clearAlts()	Функция, присваивающая переменным altDy , altHint (см.табл.3.) значение NaN



- MATLAB Function
B = By(hk, curve, Dy, Dx)
- MATLAB Function
B = Bup(hk)
- MATLAB Function
B = Bdn(hk)
- MATLAB Function
B = Bst(h)
- MATLAB Function
B = dBud(h)
- MATLAB Function
Hm = Hm(Dy)
- MATLAB Function
clearAll

Рисунок 4. Граф переходов конечного автомата, реализующего модель гистерезиса

Таблица 3.

Переменная	Вид	Назначение
By	выходная	Выходная переменная функции, моделирующей гистерезис
Hx	входная	Аргумент функции, моделирующей гистерезис
dcF	входная	(direction changed Flag) логический флаг смены направления. Равен лог.единице на следующем такте после смены знака производной входного сигнала на противоположный и лог.нулю в остальное время. Является входной переменной для конечного автомата, поступающий от внешней логической схемы, анализирующей входной сигнал Hx . (см. Прил.2)
incF	входная	(increase Flag) логический флаг нарастания входного сигнала Hx . Равен лог.единице, если производная входного сигнала неотрицательна и лог.нулю в противном случае. Так же поступает от внешней логической схемы, анализирующей входной сигнал Hx . (см. Прил.2)
Dy	локальная	Текущее вертикальное смещение для кривой
Dx	локальная	Текущее горизонтальное смещение для кривой
curve	локальная	Ключ, определяющий тип кривой, на которой находится рабочая точка в данный момент: 0 : Bst(H) ; 1 : Bup(H) ; 2 : Bdn(H)
Hint	локальная	Абсцисса точки пересечения текущей кривой с начальной кривой
Bd	локальная	Значение для выбора типа очередной кривой, рассчитанное по (4)
altDy, altHint	локальная	Альтернативные значения вертикального смещения и абсциссы точки пересечения для принудительной установки. Если принудительная установка не требуется, переменные должны иметь значение NaN
Hc,Br, Bs,mur	параметр	Параметры Hc , Br , Bs , μ_r соответственно, определяющие геометрию петли гистерезиса согласно математическому описанию Чана
threshold1	параметр	Параметр, определяющий порог обнаружения пересечения кривых. Если при некотором значении Hx расстояния по ординате между кривыми становится между величины threshold1 , то регистрируется их пересечение.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты работы модели гистерезиса представлены на рис. 5.

Видно, что точность полученных кривых невысока, особенно при приближении к насыщению (что характерно для модели Чана), но общая картина вполне адекватна, чего достаточно для синтеза и отладки регулятора, учитывающего гистерезисное поведение.

Следует заметить, что построенная модель гистерезиса обладает следующими особенностями:

– переход с кривой частного цикла на начальную происходит со скачком величиной,

не превышающей величину **threshold1**;

– при переходах на начальную кривую происходит резкое изменение производной функции, что особенно заметно при пресечениях под углами близкими к 90° (см. рис. П1.1.)

Решить первую проблему можно уменьшением параметра **threshold1** до приемлемого уровня, что, однако, потребует уменьшения шага интегрирования, особенно при быстроизменяющихся сигналах.

Для решения второй проблемы можно применить апериодическое звено (см. Приложение 1) или специальный механизм сглаживания.

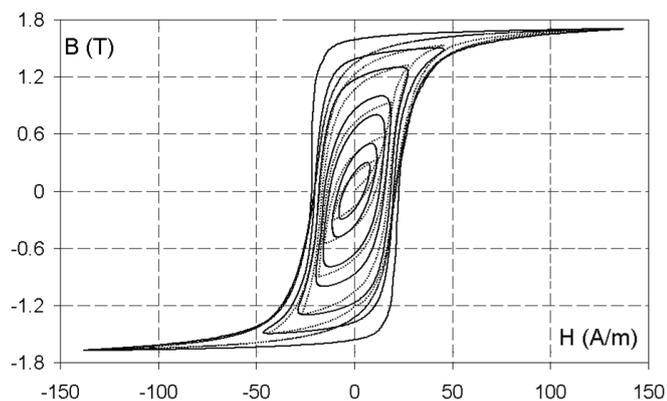
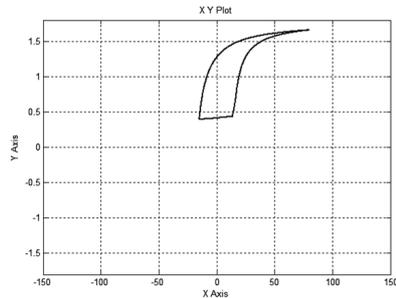


Рисунок 5.

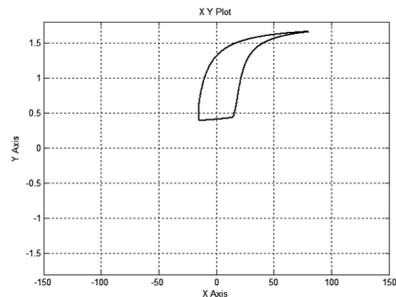
Сравнение экспериментального (сплошные кривые) и смоделированного (пунктирные кривые) семейства петель гистерезиса в координатах **H-B** (Напряжённость магнитного поля - Магнитная индукция) для текстурированной электротехнической стали при синусоидальном изменении полей

Приложение 1.

Для устранения острой разрывной нелинейности по производной выходного сигнала может быть применено сглаживание с помощью добавления в выходную цепь апериодического звена. Острота нелинейностей при этом резко уменьшается (рис. П1.1). Помимо сглаживания, апериодическое звено вносит



а

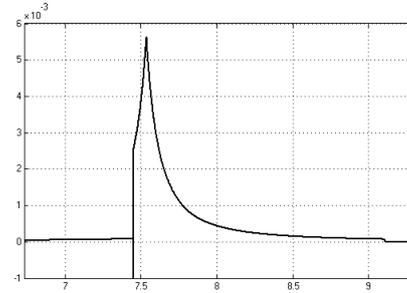


б

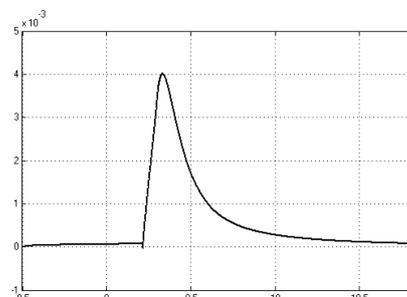
фазовую задержку и делает петлю гистерезиса частотно-зависимой, что соответствует поведению реальных систем с гистерезисом.

Приложение 2.

Логическую схему, анализирующую входной сигнал Hx на предмет смены знака производной можно организовать следующим образом (рис. П2.1, П2.2).



б



г

Рисунок П1.1.

Переход на начальную кривую с углом, близким к 90°

а) без апериодического звена в выходной цепи, б) с апериодическим звеном в выходной цепи); и производная выходного сигнала

б) без апериодического звена в выходной цепи, г) с апериодическим звеном в выходной цепи

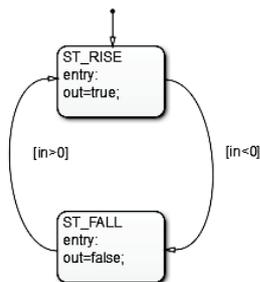


Рисунок П2.1.

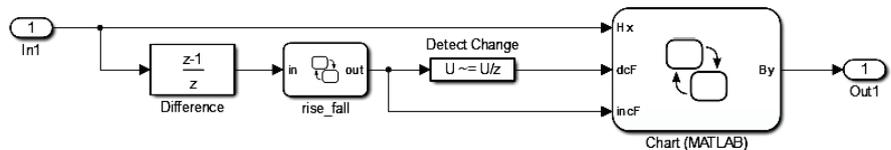


Рисунок П2.2.

Логическая схема анализа входного сигнала (а), содержимое блока *rise_fall*

Список литературы:

1. John H. Chan, Andrei Vladimirescu, Xiao-Chun Gao, Peter Liebmman and John Valainis Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation. IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTER-AIDED DESIGN. VOL. 10. 1991. No 4.

2. Красносельский М. А., Покровский А. В. Системы с гистерезисом. - М.: Наука, 1983

3. Попов Е.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. -М.: Наука, 1988

МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ КРЕНА ДЛЯ БЫСТРОВРАЩАЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

ЛАРИН А.В. - рядовой, оператор 3-ей научной роты



Ларин А.В.

Развитие современной техники обуславливает необходимость в навигационных системах для определения параметров ориентации объектов в пространстве, построенных на различных физических принципах. Данные системы применяются для позиционирования стационарных объектов и для определения параметров ориентации подвижных объектов различного базирования (наземного, водного и воздушного).

Области применения таких систем расширяются, вместе с тем, возрастают требования к ним по точности определения параметров ориентации, минимизации массы, габаритов, стоимости, энергопотребления, времени готовности и способности интегрироваться в современные системы управления объекта.

Ключевые слова: навигация, магнитное поле Земли, интегрированные бесплатформенные системы ориентации, магнитометр.

Для управления различными аппаратами, а также для определения их координат, в процессе их движения необходимо измерять угол крена. Как правило, данная задача решается с помощью устройств на основе трехстепенных гироскопов. Указанные устройства обладают значительными для малогабаритного летательного аппарата массами и габаритами.

Для повышения точности применяют магнитометрические измерители, обеспечивающие автономное измерение крена без нарастающей со временем погрешности и имеющие малые габариты и массу.

Значения элементов земного магнетизма берутся из специальных карт магнитного поля Земли. Из-за векового изменения магнитного поля Земли эти карты требуется обновлять примерно каждые 5 лет.

Магнитометрический измеритель крена состоит из магнитометра, микропроцессора, который передает магнитометру параметры настроек, с которыми должен работать магнитометр, и преобразователя из интерфейса SPI в интерфейс USB. Магнитометр, в свою очередь, состоит из трех, расположенных взаимно перпендикулярно, анизотропных магниторезистивных датчиков, мультиплек-

сора, аналого-цифрового преобразователя, компенсатора смещения нуля и микроконтроллера, который осуществляет настройку магнитометра, сбор данных с датчиков и передачу этих данных. Преобразователь из интерфейса SPI в интерфейс USB состоит из двух последовательных преобразователей. Первый – это преобразователь из интерфейса SPI в интерфейс COM, а второй – преобразователь из интерфейса COM в интерфейс USB. Наличие такого преобразователя интерфейса позволяет легко подключить магнитометрический измеритель крена к любому ПЭВМ и посредством специальной программы производить обработку поступающих с измерителя данных и вычисление угла крена.

Данные с трех анизотропных магниторезистивных датчиков 1, 2 и 3 поступают в мультиплексор 4, который последовательно передает данные в 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь 5, из которого данные поступают во встроенный микроконтроллер 7, который отвечает за настройку магнитометра и за передачу данных от магнитометра к микропроцессору 8. По запросу микропроцессора 8 микроконтроллер 7 последовательно передает данные о проекциях вектора напряженности магнитного поля

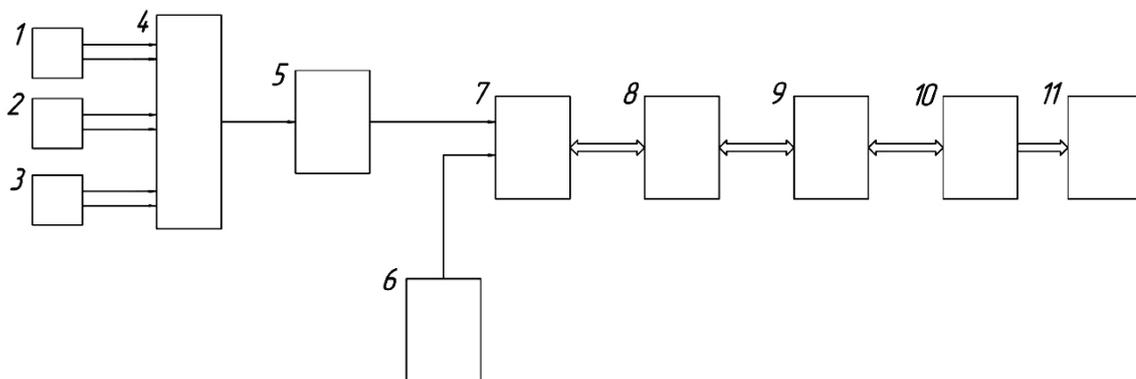


Рисунок 1.

Схема электрическая структурная макета магнитометрического измерителя крена вращающегося летательного аппарата:

*1, 2, 3 – анизотропные магниторезистивные датчики; 4 – мультиплексор;
5 – аналого-цифровой преобразователь; 6 – компенсатор смещения нуля;
7 – микроконтроллер; 8 – опрашивающий микропроцессор; 9 – преобразователь из интерфейса SPI в интерфейс COM; 10 – преобразователь из интерфейса COM в интерфейс USB; 11 – ПЭВМ*

Земли в микропроцессор 8 по интерфейсу SPI. Микропроцессор принимает данные от магнитометра и передает их на преобразователь интерфейса SPI в интерфейс USB. Далее данные из преобразователя для дальнейшей обработки поступают на ПЭВМ, где с помощью специальной программы они обрабатываются и вычисляются углы тангажа и крена.

Основными параметрами магнитометров являются диапазон измерений, разрешающая способность, частота обмена данными.

В настоящее время широко распространены магнитометры двух видов: феррозондовые (fluxgate) магнитометры и анизотропные магниторезистивные датчики (АМР-магнитометры). Феррозондовые магнитометры предназначены для измерения абсолютного магнитного поля при низких температурах, они обладают меньшей чувствительностью, но могут измерять быстроменяющиеся поля с высокой амплитудой.

В области построения прецизионных магнитных датчиков чаще используют анизотропный магниторезистивный эффект (АМР-эффект). Такая ситуация, в первую очередь, связана со следующими, присущими этим датчикам качествами [2]:

- высокая разрешающая способность (до $\Delta B = 2,7$ нТл);
- высокий показатель чувствительности

(до $\gamma = 4$ мВ/В/Тл· 10^{-4});

- линейризованная выходная характеристика датчика в рабочем диапазоне;
- чувствительность к знаку измеряемого магнитного поля;
- относительно широкий частотный диапазон ($f = 0-1000$ Гц);

Наиболее подходящими для задачи навигации по магнитному полю являются анизотропные магниторезистивные датчики.

На основе структурной схемы был создан макет магнитометрического измерителя крена (рис. 2) и проведены его испытания.

По результатам статических испытаний были определены время начальной выдержки макета и погрешности его измерений (рис. 3).

Как видно из рис. 3 время начальной выдержки составляет 70 мс, а погрешность измерения составила 1%.

Для оценки перекрестной чувствительности макета необходимо поочередно направлять оси макета вдоль вектора напряженности магнитного поля Земли так, чтобы показания по направляемой оси были максимальными, а по двум другим, перпендикулярным к ней, осям минимальные. Полученные значения записаны в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что перекрестная чувствительность осей макета магнитометрического измерителя угла крена не превышает 1%.

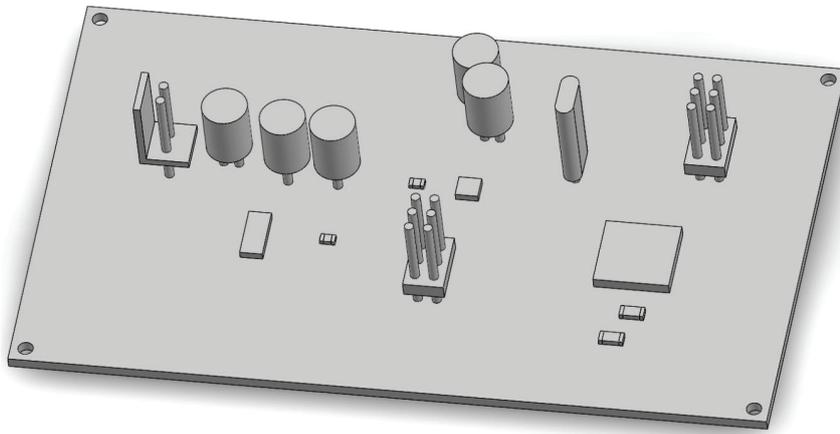


Рисунок 2.
Модель платы печатной макета
магнитометрического измерителя крена

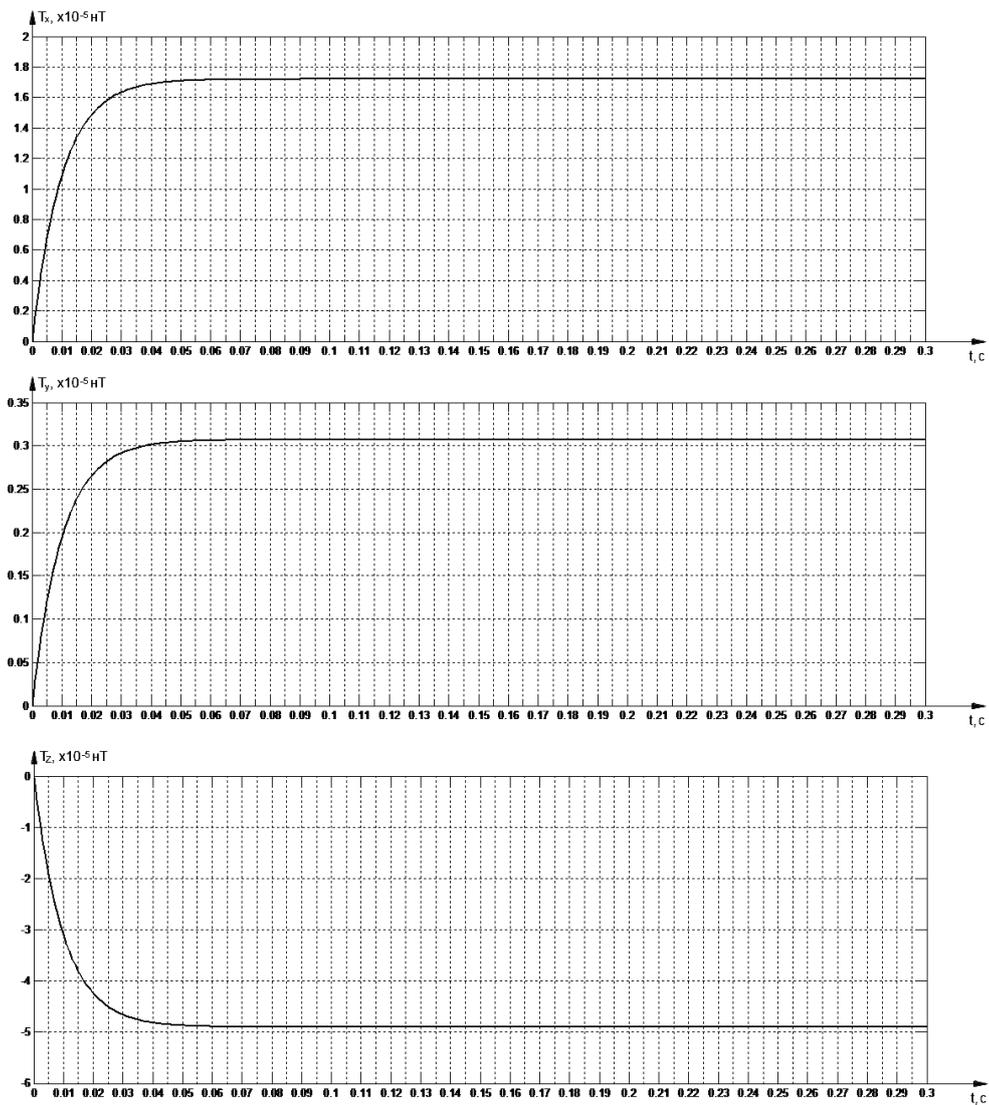


Рисунок 3.
Результат испытания для определения времени начальной выдержки
и погрешности измерения макета

Таблица 1.
Определение перекрестной чувствительности макета

Проверяемые оси Направляемая ось	Значения по осям, Тл		
	X	Y	Z
Ось X	$516,25 \cdot 10^{-7}$	$0,9 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$
Ось Y	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$516,20 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Ось Z	$0,5 \cdot 10^{-7}$	$0,2 \cdot 10^{-7}$	$516,30 \cdot 10^{-7}$

Результаты динамических испытаний показаны на рисунках 4, 5, 6, 7.

Из рисунков 4, 5, 6 и 7 видно, что макет магнитометрического измерителя крена при вращении передает на ПЭВМ сигналы пропорциональные изменению угла крена при вращении вокруг оси X.

Следовательно задачу определения угла крена вращающегося по крену летательного аппарата можно решить используя магнитометрический измеритель угла крена.

Как видно из результатов испытаний у магнитометрического измерителя крена отсутствует накапливаемая со временем ошибка,

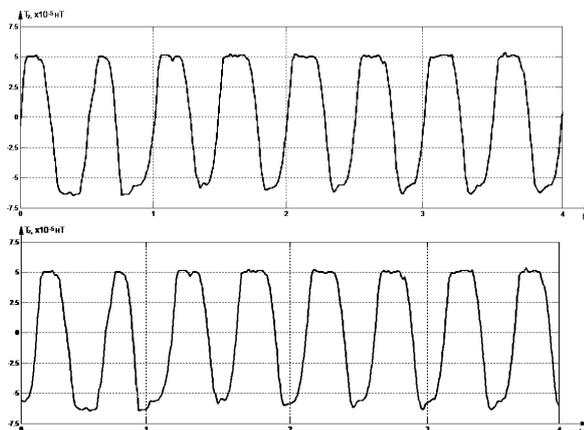


Рисунок 4.

Сигналы макета магнитометрического измерителя крена при вращении его по крену с частотой 2 Гц

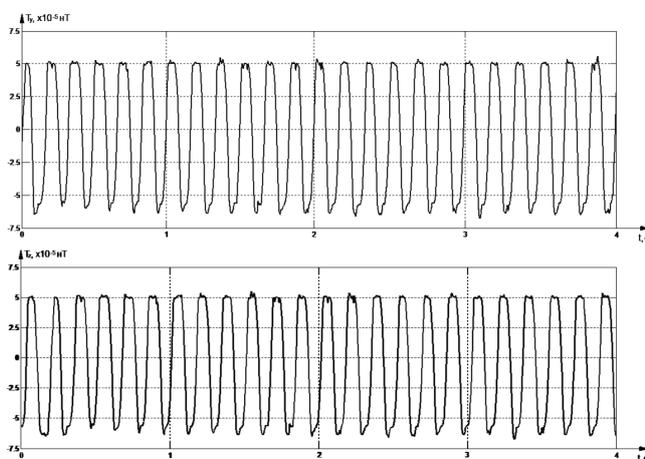


Рисунок 5.

Сигналы макета магнитометрического измерителя крена при вращении его по крену с частотой 6 Гц

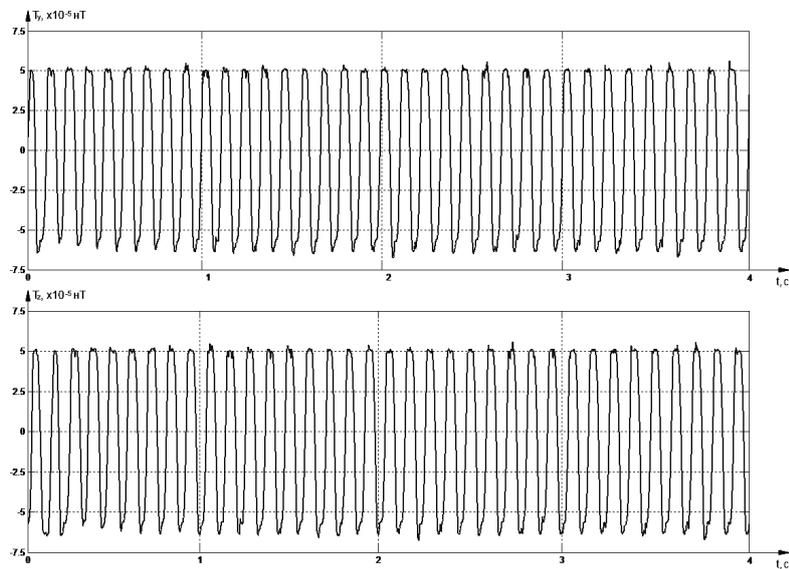


Рисунок 6.

Сигналы макета магнитометрического измерителя крена при вращении его по крену с частотой 9 Гц

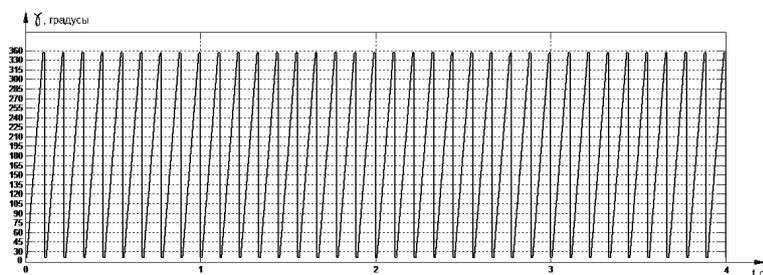


Рисунок 7.

График изменения крена при вращении макета магнитометрического измерителя угла крена вращающегося летательного аппарата

что позволяет использовать его для комплексирования с прецизионными навигационными системами или в качестве резервной. Также, благодаря невысокой стоимости и сравнительно малым габаритам данное изделие можно устанавливать практически на любые объекты, требующие определения их углового положения по углу крена.

Минусом разработанного макета является то, что для определения углов крена и тангажа необходимо заранее знать угол азимута и учитывать изменение магнитного поля Земли при разработке программного комплекса для обработки сигналов магнитометрического датчика крена.

Список литературы:

1. Савельев В.В. Гироскопы, гироскопические

приборы и системы : учеб. пособие / В. В. Савельев. – 2-е изд., перераб. и доп. –Тул. гос. техн. ун-т. : Тула, 1994. – 165 с.

2. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника /М. Л. Бараночников. –М : ДМК Пресс, 2001. – 544 с.

3. Михлин Б.З. Геомагнитная навигация / Б.З. Михлин, В.П. Селезнев, А.В. Селезнев – М.: Машиностроение, 196. – 379 с.

4. Семевский Р.Б. Специальная магнитометрия / Р. Б. Семевский, В. В. Аверкиев, В. А. Яроцкий. – СПб : Наука, 2002. – 228 с.

5. Белоглазов И. Н. Основы навигации по геофизическим полям / Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П. – М. : Наука, 1985. – 379 с

6. Янковский Б. М. Земной магнетизм: учеб. пособие / Б. М. Янковский. –4-е изд., перераб. и доп. –Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. – 252 с.

ГИРОКООРИНАТОР НА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ

ЦАЙЗЕР М.С. - рядовой, оператор 3-ей научной роты



Цайзер М.С.

Рассмотрена возможность применения новой конструкции гироскоординатора, основанная на применении микромеханических гироскопов, проведено исследование и анализ его погрешностей.

Ключевые слова: гироскоординатор, гироскопический раскладчик команд, микромеханический гироскоп, анализ погрешностей.

Для вращающегося по крену летательного аппарата (ЛА) требуется преобразование сигналов управления из системы координат наземной аппаратуры управления в систему координат вращающегося ЛА. Эта задача решается гироскопом, который называется гироскопическим раскладчиком команд (ГРК), или гироскоординатором, который в настоящее время реализуется на трехстепенном астатическом гироскопе.

Между тем, на протяжении уже более 20 лет успешно разрабатываются инерциальные датчики и датчики для измерения различных физических величин (давление, температура и др.) на основе МЭМС (микроэлектромеханические системы) технологий. Эти датчики отличаются малыми габаритами, массой, энергопотреблением. Гироскопы и акселерометры, изготовленные на базе МЭМС технологий, в настоящее время уже достигли тех параметров точности, которые дают возможность создавать на их основе различные по назначению и схемотехнике измерители параметров движения ЛА [1].

В связи с этим разработка и анализ бескарданного гироскоординатора на основе МЭМС технологий, является актуальной задачей.

В работе рассматривается возможность построения гироскоординатора по бескарданной схеме на микромеханических гироскопах (ММГ), а так же анализ его погрешности.

Некоторые типы ММГ, обладая хорошей чувствительностью и умеренным дрейфом нулевого сигнала, имеют ограничения по диапазону угловых скоростей (не более 1000 град/с) [1]. В этом случае измерительную часть гироскоординатора можно построить на основе двух ММГ, измерительные оси которых, расположены под углами – по отношению к продольной оси ракеты.

Инерциальные датчики ММГ 1 и ММГ 2 монтируются на плате под расчетным углом (рис. 1). Так же на плате располагается микропроцессор, который реализует алгоритм гироскоординатора с параметрами Родрига-Гамильтона. Питание подается с аккумулятора.

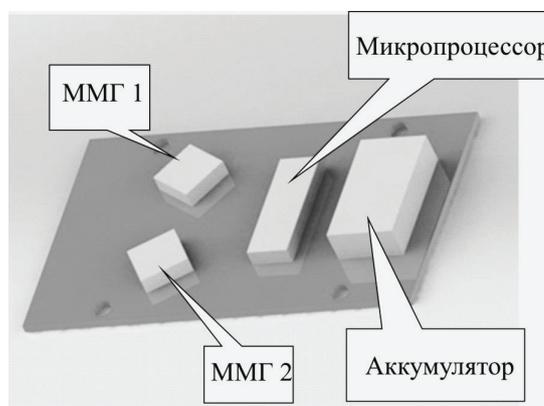


Рисунок 1.
Плата гироскоординатора

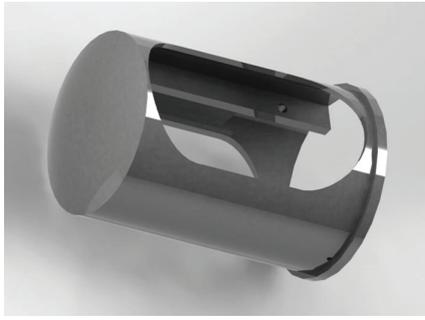


Рисунок 2.
Внутренний каркас

Плата посредством четырех винтов прикручивается к каркасу. Каркас предполагается выполнить из алюминиевого сплава, литьём под давлением.

Внутренний каркас представлен на рис. 2.

Каркас монтируются в кожух представленный на рис. 3.

Облик гироскоординатора в сборке с разрезом показан на рис. 4.

Составные части сборки представлены на рис. 5.

Далее представлены результаты анализа погрешности гироскоординатора на основании величины фазы. Величина фазы характеризует погрешность гироскоординатора т.к. от ее значения будет зависеть, в какой момент времени происходит срабатывание рулевого привода ракеты.

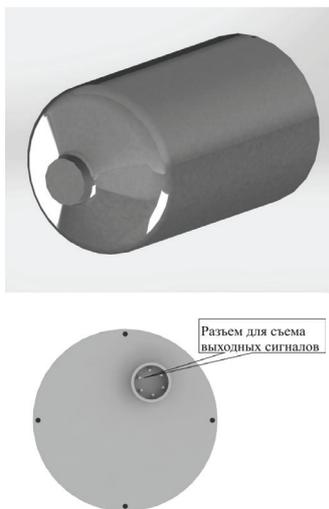


Рисунок 3.
Кожух и задняя крышка гироскоординатора

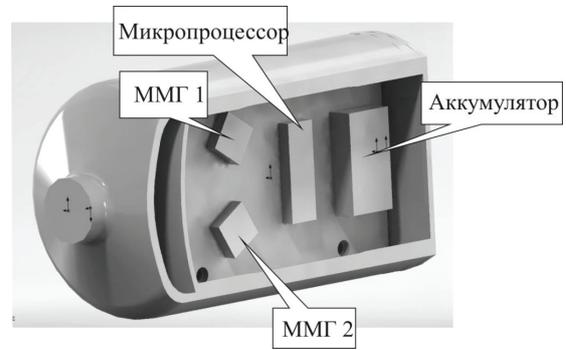


Рисунок 4.
Облик гироскоординатора в сборке с разрезом

Путем моделирования в программе MATLAB и MathCad, зависимости средне-квадратического отклонения (СКО) фазы от времени, были рассмотрены различные виды погрешности гироскопа:

- систематическая погрешность компенсации нулевого сигнала

При моделировании, неисключенные постоянные систематические погрешности гироскопов задавались в виде случайной величины распределенной по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и СКО равным 30 град/ч.

На рисунке 6 приведены 10 фазовых погрешностей гироскоординатора, которые лежат в полосе $\pm 3\sigma_{\varphi}^{г\gamma\text{то}}(t)$. За время полета 20 сек, СКО фазовой погрешности составила $\sigma_{\varphi}^{\text{sys}}(20) = 0.1788$ град.

- «белый шум» выходного сигнала

Для моделирования влияния «белого шума» выходного сигнала гироскопа на фазовую погрешность гироскоординато-

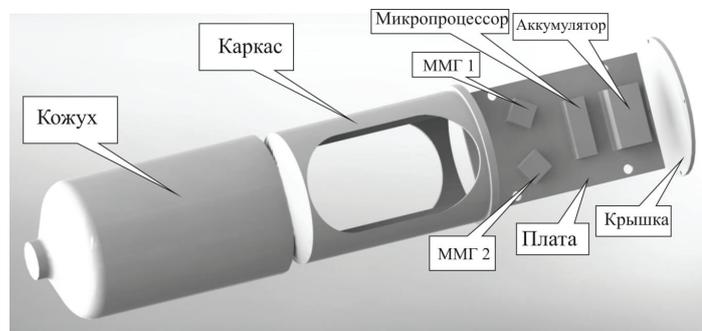


Рисунок 5.
Составные части гироскоординатора

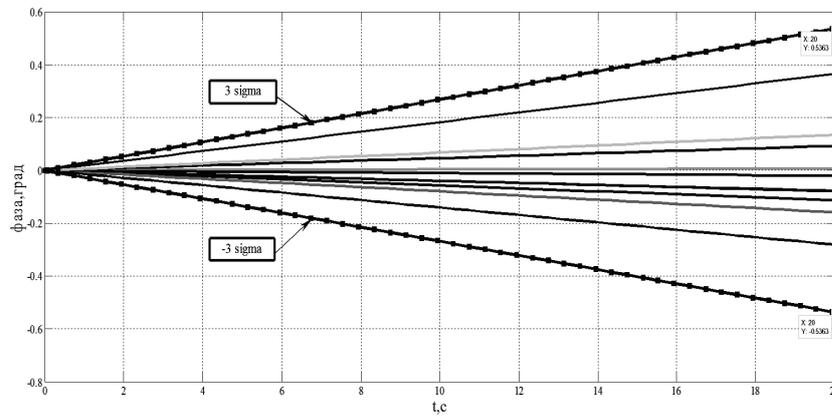


Рисунок 6.
Фазовые погрешности гироскоординатора

ра, была разработана модель в программе MATLAB. Случайное блуждание угла (Angle Random Walk (ARW)) задавалось на уровне 0.05 град/√с.

Результаты моделирования представлены на рис. 7.

На рис. 7 приведены 10 фазовых погрешностей гироскоординатора, все реализации практически укладываются в полосу $\pm 3\sigma_{\varphi}^{gyro}(t)$. За время полета 20 с, СКО фазовой погрешности составила $\sigma_{\varphi}^{sys}(20) = 0.3159$ град.

– нестабильность нуля выходного сигнала

Для моделирования влияния нестабильности нуля выходного сигнала гироскопа на фазовую погрешность гироскоординатора была использована формула:

$$\sigma_{\varphi}^{bi}(t) = \sigma \sqrt{2T_c^{\Delta\omega}} \sqrt{t + T_c^{\Delta\omega} \left(2e^{-t/T_c^{\Delta\omega}} - \frac{1}{2}e^{-2t/T_c^{\Delta\omega}} - \frac{3}{2} \right)} \quad (1)$$

Расчет производился в программе MathCad. Параметры моделирования:

$T_c^{\Delta\omega} = 150$ с – время корреляции, $\sigma = 5, 10, 30$ рад/с – СКО.

График зависимости СКО от времени полета представлен на рис. 8.

Из рис. 8 следует, что для данного уровня нестабильности нуля гироскопов фазовая погрешность составляет не более 0.05 град.

– нестабильность масштабных коэффициентов

Для моделирования возникающей погрешности от нестабильности масштабных коэф-

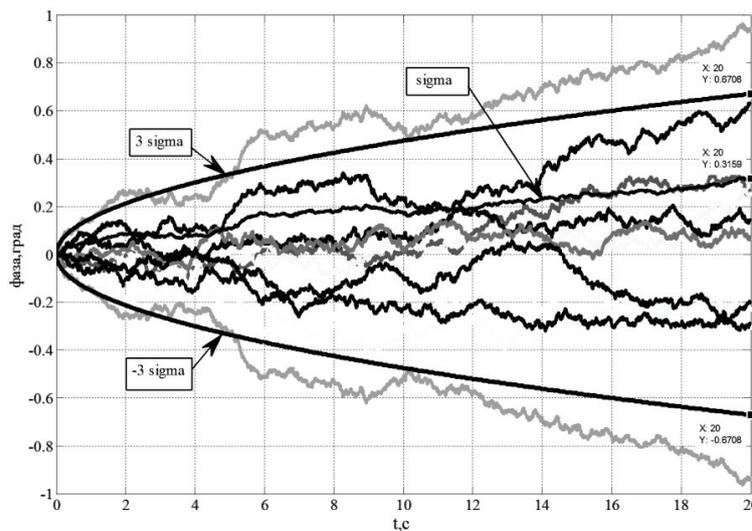


Рисунок 7.
Фазовые погрешности гироскоординатора

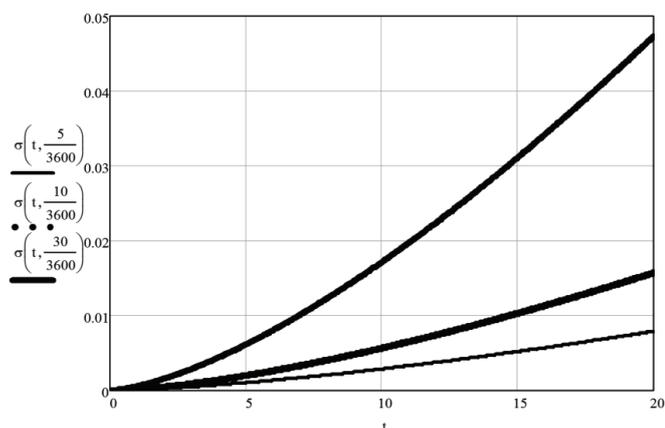


Рисунок 8.

Зависимости СКО от времени полета

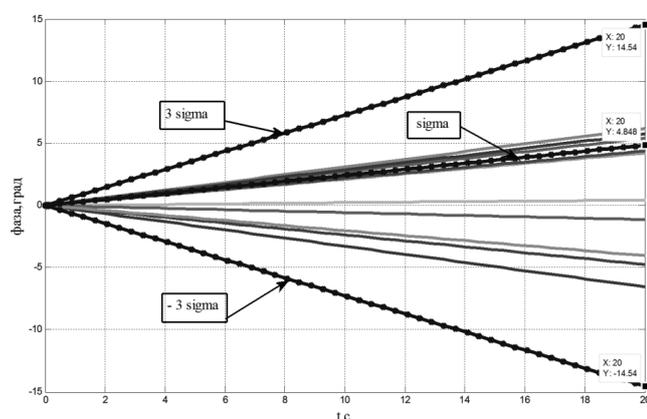


Рисунок 9.

Фазовые погрешности гирокоординатора
(при $\Delta K^r(0,5)$)

коэффициентов гироскопов, зададим величину нестабильности в виде случайной величины распределенной по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и СКО равным 0,5 град/ч, 1 град/ч, 2 град/ч.

Угловая скорость крена была задана постоянной и равнялась 20π рад/с.

Результаты моделирования представлены на рис. 9.

На рисунке приведены 9 фазовых погрешностей гирокоординатора, которые лежат в полосе $\pm 3\sigma_9^{gyro}(t)$. За время полета 20 сек, СКО фазовой погрешности составила $\sigma_\varphi^{sys}(20)=4,848$ град.

Аналогично были получены результаты моделирования, когда погрешность коэффициента преобразования гироскопа ΔK^a составляла 1% и 2%. За время полета 20 сек, СКО составила $\sigma_\varphi^{sys}(20)=11,64$ град и $\sigma_\varphi^{sys}(20)=12,84$ град, соответственно для $\Delta K^r=1\%$ и $\Delta K^r=2\%$.

Из анализа полученных результатов моделирования видно, что нестабильности масштабных коэффициентов гироскопа в значительной мере влияют на показания гирокоординатора.

Полученные результаты могут быть использованы при анализе работы контура наведения ЛА в ручном или автоматическом режиме.

В данной работе предложена новая конструкция гирокоординатора, основанная на применении ММГ, проведено исследование и анализ погрешностей бескарданного гирокоординатора на микромеханических гироскопах.

Список литературы:

1. Распопов В.Я. Гиросприборы и системы управляемых ракет ближней тактической зоны: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013.-248 с.
2. Матвеев В.В. Инерциальные навигационные системы: Учебное пособие. Изд-во ТулГУ, 2012,-199 с.
3. Матвеев В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем/В.В. Матвеев, В.Я. Распопов. Под ред. В.Я. Распопова. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2009.-280с.

ПРИМЕНЕНИЕ В АСТРОНОМИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ И ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЮСТИРОВКИ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

ДЕВЯТЕРИКОВ Е.В. - ефрейтор, оператор 3-ей научной роты



Девятериков Е.В.

Данная статья рассказывает о применении пьезоэлектрических материалов, обеспечивающих увеличения ресурса работы и повышения точности мехатронных модулей в астрономии, космических исследованиях и робототехнических комплексах. Пьезоэлектрики, первоначально применявшиеся в полупроводниковой промышленности, сейчас широко распространены для точной юстировки с нанометрической точностью громоздких оптических элементов весом десятки килограмм.

Ключевые слова: пьезоэлектрик, пьезодвигатель, пьезоактюатор, гексапод, прецизионный привод.

В конструкции большинства громоздких оптических телескопов для контроля положения главного зеркала используются электроприводы с механическими передачами. Они необходимы для корректировки положения зеркала, чтобы компенсировать воздействие гравитации и температурные перепады. Отклонение температуры конструкции крупногабаритных телескопов даже на доли градуса ведет к сдвигу зеркал и ухудшению качества изображения. Поэтому разработка многостепенных прецизионных приводов необходима для юстировки оптических элементов с целью получения снимков высокого разрешения.

В качестве многостепенных приводов предлагается использование гексаподов. Гексапод представляет собой шестикоординатную систему микропозиционирования, работающую по принципу параллельной кинематики. Системы параллельной кинематики, по сравнению с системами последовательной кинематики, имеют большую жесткость, меньшие габариты, не обладают движущимися кабелями, что уменьшает трение и увеличивает точность позиционирования.

Подвижная платформа гексапода приводится в движение с помощью 6-ти независимых прецизионных двигателей, благодаря чему можно проводить позиционирование по трём линейным координатам (X, Y, Z) и трём координатам вращения во-

круг соответствующих осей (θ_X , θ_Y , θ_Z).

Электродвигатели в настоящее время достигли предела миниатюризации. Уменьшение размеров усложняет процесс сборки, теряется эффективность двигателя, для получения линейных перемещений необходимы механические передачи и редукторы, при этом возрастают размеры устройства, увеличиваются суммарные люфты. Поэтому представляется перспективным построение многостепенных приводов на основе пьезоэлектрических двигателей, т.к. они обладают уникальной совокупностью положительных свойств, а именно:

- самоторможение при отсутствии питания;
- высокая точность позиционирования до долей нанометра, ограниченная только



Рисунок 1.
Гексапод

возможностями управляющей электроники;

- отсутствие трущихся и промежуточных частей;
- низкая потребляемая мощность;
- высокое соотношение сила/масса, что обеспечивает быстрый отклик;

- отсутствие электромагнитного излучения;
- возможность работы в сверхвысоком вакууме;

- возможность гибкой разработки конструкции пьезодвигателя с требуемыми характеристиками для выполнения конкретной задачи.

Выбор пьезоматериалов для пьезодвигателей осуществляют в основном по следующим параметрам: пьезомодуль в направлении рабочих деформаций, модуль Юнга, коэффициент электромеханической связи и механическая добротность. Они определяют диапазон перемещений, упругие и резонансные свойства, эффективность преобразования электрической энергии в механическую, степень затухания колебательных процессов [2].

При конструировании пьезодвигателей учитывают такие недостатки пьезокерамики, как ползучесть (изменение величины перемещения в течение времени при фиксированном значении напряжения) и гистерезис (нелинейная и неоднозначная зависимость величины перемещения и удлинения от изменения воздействующего напряжения). Для уменьшения влияния гистерезиса на точность позиционирования пьезодвигателем применяют системы управления с датчиками положения и обратной связью.

Существует большое разнообразие пьезодвигателей и пьезоактюаторов, различающихся по частоте и напряжению управляющих сигналов, по характеру создаваемых перемещений, по принципу действия и др. Пьезодвигатели, работающие на низких частотах управляющего сигнала (ниже их резонансной частоты) относятся к дорезонансным, а на высоких частотах (равных резонансным) – к резонансным.

По характеру создаваемых перемещений пьезодвигатели могут быть линейные и роторные. По принципу действия пьезодвигатели можно разделить на следующие виды: ударного действия (вибродвигатели), деформационного действия (шаговые двигатели) и силового действия (силовые двигатели).

В первом случае подвижная часть двигателя приводится под действием ударов, передаваемых от пьезоэлемента с частотой собственных колебаний (резонансной частотой).

Во втором – подвижная часть последовательно перемещается с определённым шагом вследствие изменения напряжённодеформированного состояния его элементов под действием пьезоэлементов.

В третьем – силовое воздействие непосредственно (или через передаточное звено) передаётся на объект от пьезоэлемента, при этом осуществляются угловые или линейные перемещения в ограниченном диапазоне [1].

Таким образом, многостепенные прецизионные приводы на основе пьезоэлектрических двигателей будут обладать следующими преимуществами:

- большое усилие без дополнительных механических передач;
- высокий КПД;
- возможность работы в условиях вакуума; возможность обеспечить малые угловые и линейные перемещения;
- отсутствие магнитного поля;
- не подверженность износу.
- низкое потребление энергии (даже под воздействием больших нагрузок актюаторы не потребляют энергию);
- малые габариты и масса по сравнению с электромагнитными двигателями;
- высокая скорость срабатывания.

Российские производители пьезоактюаторов и пьезодвигателей лишь частично удовлетворяют потребности отраслей промышленности. Значительная их часть импортируется из-за рубежа. Поэтому, значимость решения задач, направленных на решение проблем создания пьезоактюаторов и пьезодвигателей в целях усиления конкурентных позиций отечественных производителей, высока.

Список литературы:

1. Бардин В.А. «Системы управления высокоточными устройствами позиционирования на основе пьезоэлектрических актюаторов». Пенза: ПГУ, 2015 г.
2. Бардин В.А., Васильев В.А., Чернов В.А. «Состояние и задачи области создания пьезоактюаторов и пьезодвигателей». Пенза: ПГУ, 2014 г.

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

ГУРОВ А.Н. - рядовой, оператор 3-ей научной роты



Гуров А.Н.

Для решения проблем администрирования сети необходимо знать состояние каждого ее элемента с возможностью изменять параметры его функционирования. Сложная вычислительная сеть требует дополнительных специальных средств управления помимо тех, которые имеются в стандартных сетевых операционных системах. Это связано с большим количеством разнообразного коммуникационного оборудования, работа которого критична для выполнения сетью своих основных функций.

Ключевые слова: мониторинг, система управления, SNMP, автоматизация, сетевое оборудование.

Распределенный характер крупной сети делает невозможным поддержание ее работы без централизованной системы управления, которая в автоматическом режиме собирает информацию о состоянии каждого концентратора, коммутатора и маршрутизатора и предоставляет эту информацию оператору сети.

Для решения данной проблемы предлагается разработать аппаратно-программный комплекс дифференциального мониторинга и управления объектом информатизации. Данный комплекс предназначен для:

1. дифференциального мониторинга и управления аппаратными средствами с использованием различных интерфейсов:

- Ethernet
- RS-232
- RS-422
- RS-485

2. информирования оперативного персонала о текущем состоянии контролируемых средств с использованием статуса интегрального состояния комплекса;

3. информирования оперативного персонала об изменениях состояния контролируемых средств, а также ведения журнала событий;

4. автоматизации процесса включения и выключения контролируемых средств при возникновении неисправностей.

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЬЮ

В основе любой системы управления сетью лежит схема взаимодействия «агента - менеджер». На основе этой схемы могут быть построены системы практически любой сложности с большим количеством агентов и менеджеров разного типа.

Агент является посредником между управляемым ресурсом и основной управляющей программой-менеджером. Чтобы один и тот же менеджер мог управлять различными реальными ресурсами, создается некоторая модель управляемого ресурса, которая отражает только те характеристики ресурса, которые нужны для его контроля и управления. Например, модель маршрутизатора обычно включает такие характеристики, как количество портов, их тип, таблицу маршрутизации, количество кадров и пакетов протоколов канального, сетевого и транспортного уровней, прошедших через эти порты.

Менеджер получает от агента только те данные, которые описываются моделью ресурса. Агент же является некоторым экраном, освобождающим менеджера от ненужной информации о деталях реализации ресурса. Агент предоставляет менеджеру обработанную и представленную в нормализованном виде информацию. На основе этой информации ме-

неджер принимает решения по управлению, а также выполняет дальнейшее обобщение данных о состоянии управляемого ресурса.

При работе с различными устройствами используются протоколы взаимодействия, которые данные устройства поддерживают. При этом основным протоколом взаимодействия по интерфейсу Ethernet является протокол SNMP (Simple Network Management Protocol).

Устройства, с которыми должно осуществляется взаимодействия:

1. Сетевые SNMP устройства;
2. Устройства бесперебойного питания;
3. Компьютеры в локальной сети;
4. Сетевое оборудование (маршрутизаторы, коммутаторы и т.д.).

Описание аппаратной части

Центральный контроллер аппаратно-программного комплекса дифференциального мониторинга и управления объектом информатизации является строиться на основе не менее 2-х компьютеров с 64 разрядной системой.

Описание программной части

Программное обеспечение аппаратно-программного комплекса дифференциального мониторинга и управления объектом информатизации устанавливается на каждом контроллере и использует архитектуру «клиент – сервер».



Рисунок 2.

Взаимодействие с устройствами



Рисунок 1.

Взаимодействие агента, менеджера и управляемого ресурса

Работа программного обеспечения осуществляется в режиме «основной – резервный». При этом резервный контроллер осуществляет мониторинг работоспособности основного.

Комплекс должен оповещать системных администраторов о состоянии оборудования визуальными и звуковыми сигналами.

Система мониторинга должна обладать следующими функциями:

- добавление, редактирование и удаление категорий объектов;
- добавление, редактирование и удаление объектов;
- вывод текущей информации об объекте;
- добавление, редактирование и удаление объектов по паролю;
- автоматическое присвоение статусов объекту мониторинга;
- общая настройка времени опроса для объектов;
- возможность просмотра статусов объектов через Web-интерфейс;
- возможность подключения к серверу мониторинга по API;
- просмотр информации через приложение для ОС Windows;
- звуковое оповещение об изменении статуса;
- всплывающее оповещение из трея об изменении статуса;
- отображение истории изменения статусов.

Список литературы:

1. Средства анализа и управления сетями [Электронный ресурс] <http://total100.narod.ru/olifer/head7.htm> – Дата обращения 25.05.2016.
2. Net-SNMP [Электронный ресурс] <https://net-snmp.org> – Дата обращения 25.05.2016.

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ БАЗ ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУСТОРОННИХ БОЕВЫХ ДЕЙСТВИЙ

КУЗНЕЦОВ Д.В. - рядовой, оператор 3-ей научной роты

КУТАКОВ А.Г. - ефрейтор, старший оператор 3-ей научной роты



Кузнецов Д.В.

Кутаков А.Г.

В статье приводится общая методика проектирования баз данных для систем моделирования двусторонних боевых действий. Рассматриваются вопросы онтологии боевых действий с применением средств ВКО, теория баз данных и этапы их проектирования согласно архитектуре ANSI-SPARC.

Ключевые слова: базы данных, онтология, моделирование двусторонних боевых действий, СУБД, SQL, ANSI-SPARC, концептуальное проектирование, логическое проектирование, физическое проектирование, реляционная модель данных.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сценарии, разрабатываемые для программ по моделированию боевых действий, являются заранее детерминированными, в связи с чем исход боя определен заранее. Онтология, в вопросе моделирования боевых действий, является верхней структурой по управлению СУБД (система управления базой данных) и БД (база данных), позволяющей организованно хранить информацию обо всех объектах и происходящих процессах. Онтология позволяет распределять полученные результаты по критериям, установленным специалистами, что в конечном итоге позволяет полностью автоматизировать процесс принятия решений, исключив тем самым из системы человеческий фактор, минимизировав ошибки и повысив производительность. Онтология рассматривается как основа ИИ (искусственного интеллекта), применяющегося как в информационно-поисковых системах, так и в автоматизированных системах принятия решений. Основной задачей онтологии является решение лингвистических задач, но ее можно также использовать и в вопросе выбора наилучшего варианта развития событий в системах моделирования боевых действий.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается система моделирования двусторонних боевых действий. Участники боевых действий обозначены условно: Сторона 1 и Сторона 2. Каждая из сторон имеет конкретные цели и задачи и располагает соответствующими ресурсами. Условная цель каждой из сторон (в случае инициации боевых действий) - обеспечить сохранность своих ценностных объектов и нанести наибольший урон противнику. Минимальный набор параметров, характеризующих ценностные объекты, включает в себя: наименование объекта и его географическое положение (широта, долгота). К ресурсам, которыми располагают стороны боевых действий, относятся: космические группировки (номер группировки, наклон орбиты, высота и наклон Перигея, и т.д.), СПРН (номер станции, широта, долгота, дальность и т.д.) и т.п. Результатом боевых действий является сценарий, отражающий скорость реагирования каждой из сторон, потери, нанесенный ущерб. Система моделирования боевых действий не должна быть статичной, т.е. необходимо предусмотреть ее видоизменение (добавление новых ресурсов, редактирование существующих ресурсов, участие в боевых действиях дополнительных сторон и т.п.).

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ БД

Для решения поставленной задачи, а также с целью организации и структуризации базы знаний для создания онтологии, необходимо построить базу данных (БД). Рассмотрим основные принципы проектирования БД для систем моделирования двусторонних боевых действий.

Современные БД представляют собой трехуровневую компьютерную систему (рис. 1), фундаментальным уровнем которой является сама база данных, в узком смысле представляющая собой упорядоченное множество информации об определенной сфере деятельности человека; следующий уровень – СУБД – компьютерная система, позволяющая определять, создавать и поддерживать БД, а также организующая контролируемый доступ к информации, хранящейся в БД; и внешний – третий уровень – приложение, в роли которого выступает компьютерная программа, обеспечивающая пользователю, посредством СУБД, доступ к информации, хранящейся в БД.

Рассматриваемая далее методика проектирования БД основана на архитектуре ANSI-SPARC (American National Standards Institute, Standards Planning and Requirements Committee). Данная архитектура (рис. 2) выделяет три уровня описания данных: внешний, концептуальный и внутренний.

Внешний уровень представляет собой описание решаемой задачи с точки зрения будущих пользователей БД.

На этом уровне определяется структура и тип хранимой в БД информации, способы ее обработки, вид запрашиваемой информации.

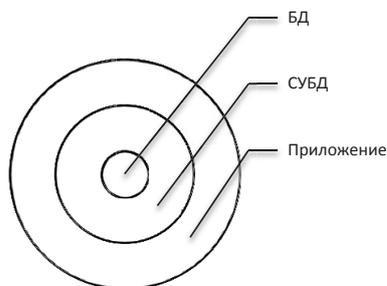


Рисунок 1.
Структура современной БД

На концептуальном уровне осуществляется комплексное описание БД с точки зрения ее разработчика: выбирается тип БД (иерархическая, сетевая, реляционная, постреляционная, многомерная, объектная), из постановки задачи выделяются типы сущностей (отношения), связи между ними, атрибуты, домены; из постановки задачи определяется набор выполняемых в БД операций (транзакций). На внутреннем уровне для БД выбирается СУБД, и спроектированная на концептуальном уровне концептуальная модель БД преобразуется во внутреннюю, учитывающую возможности и ограничения выбранной СУБД. На этом уровне из набора отношений определяется набор таблиц, ключи (первичные, вторичные), набор индексов для удобной работы с информацией, представленной в БД, а также предъявляются требования к аппаратной части приложения. Таким образом, на внутреннем уровне разрабатывается рабочий проект БД, на основе которого в дальнейшем происходит физическая реализация базы данных.

В соответствии с трехуровневой архитектурой ANSI-SPARC весь процесс проектирования БД включает в себя три этапа: концептуальное, логическое и физическое проектирование (рис. 3).

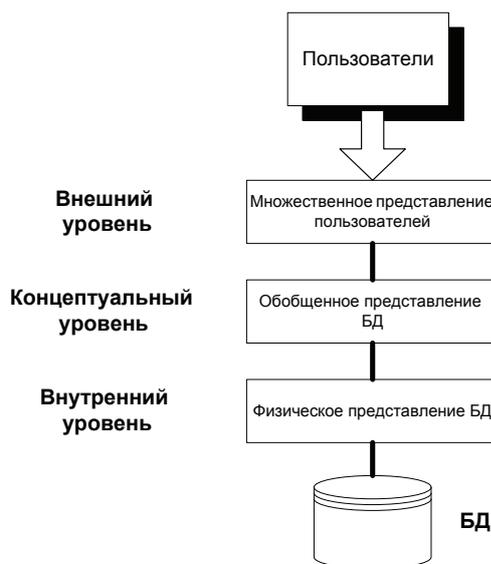


Рисунок 2.
Архитектура ANSI-SPARC

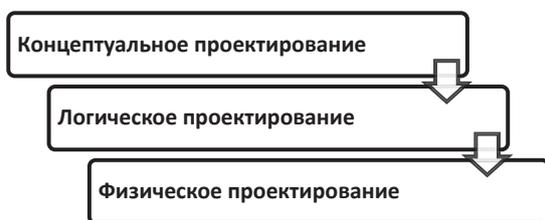


Рисунок 3.

Этапы проектирования БД

Рассмотрим каждый из этих этапов.

Процесс концептуального проектирования БД начинается с выделения из постановки задачи процессов и объектов, попадающих под определение типа сущности – некоторого множества объектов и процессов, обладающих одинаковым набором свойств. Каждый элемент такого множества называется типом сущности или сущностью. При этом выделяют слабые сущности, существование которых зависит от других сущностей, и - сильные, не зависящие от других сущностей. Из постановки задачи можно выделить такие сущности, как: участник боевых действий (участник), сценарий, ресурсы, космические группировки, ценностные объекты, СПРН. Сущность «Участник» является сильной, поскольку при упоминании «Участника» сразу становится очевидным о ком идет речь, а сущность «Космическая группировка» – слабой, поскольку нельзя однозначно сказать какому из участников принадлежит, например, «Космическая группировка №1». При проектировании БД сильные сущности обозначают прямоугольником, а слабые – двойным прямоугольником (рис. 4).

Для удобства проектирования, типы сущ-



Рисунок 4.

Типы сущности

ностей, выделенные из постановки задачи, сводятся в таблицу (табл. 1)

Следующим этапом концептуального проектирования является определение для каждой сущности ее атрибутов (уникальных характеристик) и выделение среди них потенциальных и первичных ключей. Потенциальным ключом называется набор атрибутов, выбранных для однозначной идентификации каждого экземпляра сущности. Первичный ключ – потенциальный ключ, выбранный для уникальной идентификации экземпляров сущности.

Например, для сущности «Ценностный объект» можно выделить следующие атрибуты (рис. 5): наименование, широта, долгота. На схемах атрибуты изображаются в виде эллипсов, связанных со своими атрибутами линиями. Наименования атрибутов, выбранных в качестве первичных ключей, подчеркиваются.

На этапе формирования атрибутов для каждого из них определяется домен – область допустимых значений, позволяющая точно сформулировать ограничения в базе данных, тем самым сократив количество ошибок пользователей при вводе/редактировании информации в БД. Информация об атрибутах и их доменах, по аналогии с сущностями (табл. 1), сводится в таблицу.

Таблица 1.
Типы сущностей

Наименование	Краткое описание	Синонимы	Особенности
Участник	Участник боевых действий	Сторона	Имеется два участника (рассматриваются двусторонние боевые действия), однако возможно добавление новых участников
Ценностный объект	Стратегически важный объект	Защищаемый объект	Участник может иметь множество ценностных объектов
...

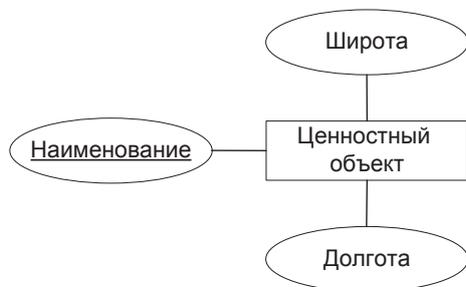


Рисунок 5.

Атрибуты сущности

После определения сущностей, атрибутов и их доменов, определяются типы связей – осмысленные взаимосвязи между типами сущностей. Взаимосвязь между отдельными экземплярами сущности называется экземпляром связи или связью. На диаграммах типы связей изображают ромбами. Если в связи участвует слабая сущность, то контур ромба делают двойным. На рис.6 приведен пример связи «Космическая группировка является ресурсом».

На этапе определения типов связи часто возникает необходимость более детального рассмотрения участия в связи отдельных

ее экземпляров. С этой целью применяют семантические диаграммы. Пример семантической диаграммы для связи «Участник располагает ресурсами» (рис. 7) изображен на рис. 8.

Еще одной важной характеристикой типа связи, определяемой на этапе концептуального проектирования БД, является степень участия в связи связываемых ею сущностей и показатель кардинальности связи. Показатель кардинальности иллюстрирует долевое отношение связываемых сущностей. Выделяют следующие показатели кардинальности: один-к-одному (1:1), один-ко-многим (1:N) и многие-ко-многим (M:N). Например, связь «Участник располагает ресурсами» имеет показатель кардинальности 1:N, поскольку один экземпляр типа сущности «Участник» может иметь в распоряжении множество экземпляров типа сущности «Ресурсы», в то время как один и тот же ресурс не может одновременно принадлежать множеству участникам. Аналогично, связь «Цен-



Рисунок 6.

Пример типа связи

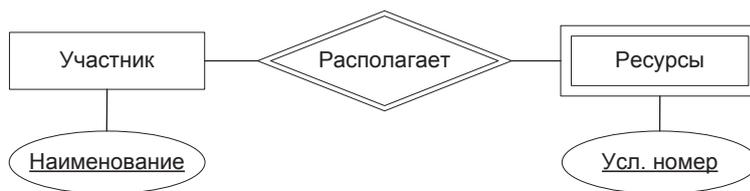


Рисунок 7.

Тип связи «Участник располагает ресурсами»

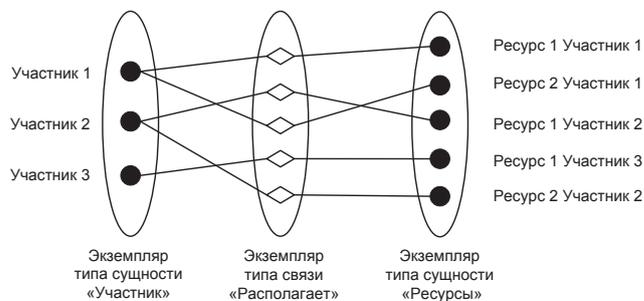


Рисунок 8.

Семантическая диаграмма связи «Участник располагает ресурсами»

ностный объект принадлежит участнику» имеет показатель кардинальности N:1.

Степень участия – параметр типа связи, характеризующийся количественным участием в связи связываемых ею сущностей. Степень участия бывает полной (Т (Total)), когда все экземпляры рассматриваемой сущности участвуют в связи, и частичной (Р (Partial)) – некоторые экземпляры сущности могут не участвовать в связи.

На диаграммах степень участия сущности в связи обозначается линиями: Т – двойной, Р – одинарной. Определение степени участия и показателя кардинальности для каждой связи на этапе концептуального проектирования позволяет избежать множества ошибок, которые могут возникнуть при физической реализации БД.

С учетом показателя кардинальности и степени участия, диаграммы связей «Участник располагает ресурсами» и «Ценностный объект принадлежит участнику» будут иметь следующий вид: рис. 9 и рис. 10.

Показатель кардинальности для связи «Ценностный объект принадлежит участнику» (рис. 10) актуален при условии, что модель БД не предусматривает возможности перехода того или иного ценностного объекта к другому участнику. С учетом данной возможности, показатель кардинальности связи будет многие-ко-многим (M:N).

Информация о типах связей, выделенных из постановки задачи, по аналогии с табл.1, сводится в таблицу.

Завершением концептуального проектирования БД является ее ER-модель (Entity-Relationship, Сущность-Связь) (рис. 11).

После концептуального проектирования следует этап логического проектирования.

Логическое проектирование – это процесс, в ходе которого модель БД, полученная на этапе концептуального проектирования, преобразуется в логическую, отвечающую требованиям конкретной модели данных.

В начале логического проектирования делается выбор модели данных (реляционная, сетевая, объектная), на основе которого концептуальная модель корректируется согласно требованиям выбранной модели. На основе скорректированной модели формируется набор отношений и связей между ними, который проверяется на соответствие требованиям нормализации (метод проектирования отношений БД, исключающий возможность появления проблем обновления данных и минимизирующий избыточность хранимой информации). Проверяется реализуемость в БД всех транзакций, а также определяются требования и способы поддержки целостности данных, хранимых в БД.

Логическое проектирование осуществляется в несколько этапов:

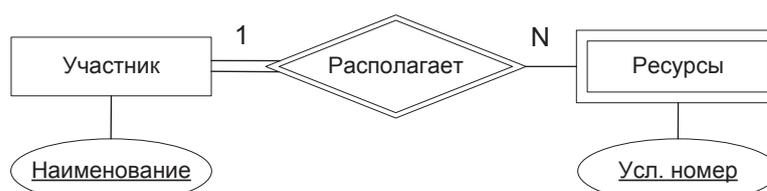


Рисунок 9.
Фрагмент ER-модели для связи
«Участник располагает ресурсами»



Рисунок 10.
Фрагмент ER-модели для связи
«Ценностный объект принадлежит участнику»

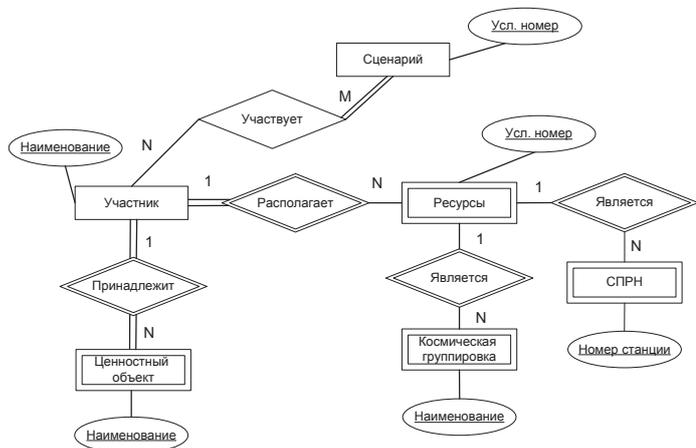


Рисунок 11.

ER-модель БД, основанная на результатах концептуального проектирования

1. Преобразование сложных связей – связей, со степенью выше второй.

2. Удаление избыточных связей – если есть возможность объединения нескольких пар сущностей в одну, при условии сохранения целостности данных, то такие сущности объединяются.

3. Преобразование связей типа многие-многим (M:N) – связи типа многие-многим не реализуются в большинстве моделей данных, в том числе в реляционных БД, поэтому они заменяются парами связей с кардинальностью 1:N с использованием промежуточных типов сущности. Например, в рассматриваемой БД, в соответствии с построенной ER-моделью (рис. 11), связь «Участник участвует в сценарии» имеет кардинальность M:N. Следуя требованиям нормализации, данная связь может быть преобразована следующим образом (рис. 12).

4. Преобразование рекурсивных связей и проверка связей с кардинальностью 1:1 – рекурсивные связи, аналогично п.3, корректируются путем использования дополнительных типов сущности; связи кардинальности 1:1 проверяются на целесообразность объединения связываемых сущностей в одну.

Изменения, внесенные в концептуальную модель, отображаются на ER-модели. Скорректированная ER-модель показана на рис. 13.

Следующим этапом логического проек-

тирования является определение набора отношений. ER-модель необходима для проверки целостности проектируемой БД, в то время как набор отношений (таблиц) позволяет проектировщику визуально представить работу БД. На данном этапе прорабатывается механизм первичных и внешних ключей - первичные ключи родительских отношений включаются в дочерние отношения посредством внешних ключей. Рассмотрим принцип механизма первичных и внешних ключей на примере отношений Участник, Ценностный объект, Ресурсы (табл. 2).

Дальнейшим этапом является проверка выделенных отношений на соответствие требованиям нормализации:

- 1 НФ – в отношении нет многозначных атрибутов.
- 2 НФ – нет атрибутов, частично зависящих от первичного ключа.
- 3 НФ – нет атрибутов, транзитивно зависящих от первичного ключа.
- 4 НФ – все детерминанты являются первичными ключами.

Скорректированная ER-модель проверяется на выполнение транзакций, планируемых к реализации в БД. Например, для добавления в БД нового Участника, должна выполняться транзакция Т1 (новый участник должен обладать ресурсами и ценностными объектами, поэтому на ER-модели должна четко отслеживаться взаимосвязь всех необходимых отношений); формирование нового сценария – транзакция Т2.



Рисунок 12.

Преобразование связи «Участник участвует в сценарии» в соответствии с требованиями нормализации

Таблица 2.
Механизм первичных и внешних ключей

	Участник	Ценностный объект	Ресурсы
Атрибуты	Наименование, Ценностный объект, Ресурсы	Наименование, Широта, Долгота, ...	Усл. номер, Наименование, ...
Первичный ключ	<u>Наименование</u>	<u>Наименование</u>	<u>Усл. номер</u>
Внешний ключ	• Ценностный объект, ссылается на Ценностный объект (<u>Наименование</u>)	---	---

Для БД задаются следующие ограничения целостности:

Определяются обязательные данные – значение которых не предусматривает отсутствие значения (NULL).

Ограничения доменов атрибутов.

Целостность сущностей – первичные ключи отношений должны быть объявлены как NOT NULL (недопустимо отсутствие значения).

Ссылочная целостность – для внешних ключей определяется механизм каскадных изменений, т.е. действия, производимые в дочерних отношениях в случае удаления или изменения родительских отношений.

Бизнес-правила – специализированный набор ограничений, обусловленный пожеланиями и требованиями пользователей БД.

После этапа логического проектирования БД следует ее физическое проектирование – процесс создания БД средствами выбранной СУБД и платформами разработки приложений. На этом этапе средствами СУБД создаются таблицы (например, посредством языка структурированных запросов SQL, позволяющего определять и формировать условия выборки данных, а также удобно осуществлять их редактирование), реализуются ограничения целостности данных. Данные индексируются, с целью скорейшего доступа к ним. Разрабатывается графический интерфейс приложения, удобный с точки зрения пользователя (обеспечивающий интуитивность и простоту работы) и программная

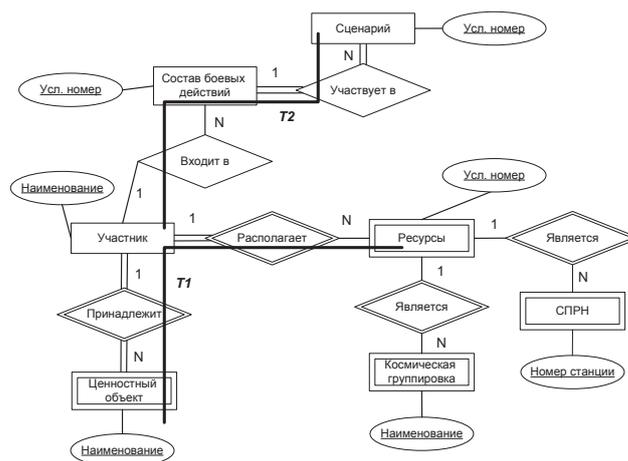


Рисунок 13.

Проверка ER-модели на выполнение транзакций

часть приложения, обеспечивающая быстроту работы и отказоустойчивость.

Рассмотренная методика проектирования БД для систем моделирования боевых действий, основанная на архитектуре ANSI-SPARC, может использоваться в качестве шаблона при решении подобного рода задач.

Список литературы:

Кириллов В.В. Структурированный язык запросов (SQL). – СПб.: ИТМО, 1994.
 Мейер М. Теория реляционных баз данных. – М.: Мир, 1987
 Тиори Т., Фрай Дж. Проектирование структур баз данных. В 2 кн., – М.: Мир, 1985.
 Цикритизис Д., Лоховски Ф. Модели данных. – М.: Финансы и статистика, 1985.
 Сервер информационных технологий (CIT), URL: <http://www.citmg.ru>

ОРГАНИЗАЦИЯ БЕЗОПАСНЫХ НЕРЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕШЕХОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ НА ОСНОВЕ СРЕДСТВ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ГУРОВ А.Н. - рядовой, оператор 3-ей научной роты



Проблема безопасности дорожного движения пешеходов остается актуальной. В наше время эта проблема никуда не исчезла, а, наоборот, учитывая высокие темпы развития автомобильного транспорта, все усложнившиеся условия движения транспортных средств приобрела остроту и требует к себе более серьезного подхода.

Гуров А.Н.

Ключевые слова: наезды на переходах, согласование включения переходов, сканирование зоны, режимы оповещения, автоматизация режимов.

Наезды на пешеходных переходах – самая острая проблема на сегодняшний день. Ее разрешение вполне возможно, но требует комплексного подхода, обеспечивающего одновременное решение некоторых традиционных для российских пешеходов проблем.

Причинами проблемы являются:

- плохая видимость пешехода в темное время суток;
- крупногабаритные автомобили, перекрывающие знак пешеходного перехода;
- в период дождя и весенней - осенней распутицы загрязненные фары транспортных средств;
- погодные условия: дождь, грязь, туман и прочее;
- плохая освещенность;
- темная одежда.

По статистике 2013 г. наезды на пешехода в темное время суток составляют 39,5% всех ДТП, что превышает дневной показатель примерно на 10%, а риск получить смертельные травмы в темное время для пешеходов повышается на 43,9%. Именно в темное время суток гибнет более двух третей: 69,1% от всех погибших пешеходов.

Проблема плохой видимости пешехода в темное время суток, когда гибнет почти 70%

из всех погибших пешеходов, требует незамедлительного решения и одним из путей решения этой задачи является освещение пешеходных переходов.

Освещение пешеходных переходов может осуществляться разными способами: от более простого варианта, посредством размещения светодиодных светильников и ламп магистрального и уличного освещения по бокам (либо непосредственно над проезжей частью пешеходной зоны), до более сложного, включающего в себя комплексы, заблаговременно предупреждающие водителей о наличии пешеходного перехода.

Для преодоления рассмотренных проблем рекомендуется разработать комплекс управления освещением нерегулируемых пешеходных переходов. Комплекс должен заблаговременно включать освещение пешеходного перехода, предупреждая водителей о наличии пешехода. В отсутствие пешеходов освещение переключается на экономный режим.

Сложность задачи заключается в обнаружении движения в заданном контуре, т.е. подошел ли пешеход к зоне перехода. При решении этой задачи возникают трудности: классификация пешеходов на переходящих



Рисунок 1.
Организация освещения пешеходных переходов

дорогу и проходящих мимо (ложное срабатывание); согласование включения освещения со скоростным режимом транспортных средств.

Классификация пешеходов может быть решена на основе построения сканирования зоны пешеходного перехода датчиками движения и ультразвуковым дальномером, с целью определения направления движения человека.

ПРИНЦИП РАБОТЫ УСТРОЙСТВА

Для иллюстрации работы устройства на рис. 2 приведён фрагмент проезжей части с двумя полосами движения в прямом и обратном направлениях и с двумя установленными устройствами. При включении устройства находятся в ждущем режиме до появления пешехода в зоне действия (9) датчиков движения (2) или до нажатия кнопок вызова (3). При появлении пешехода срабатывает

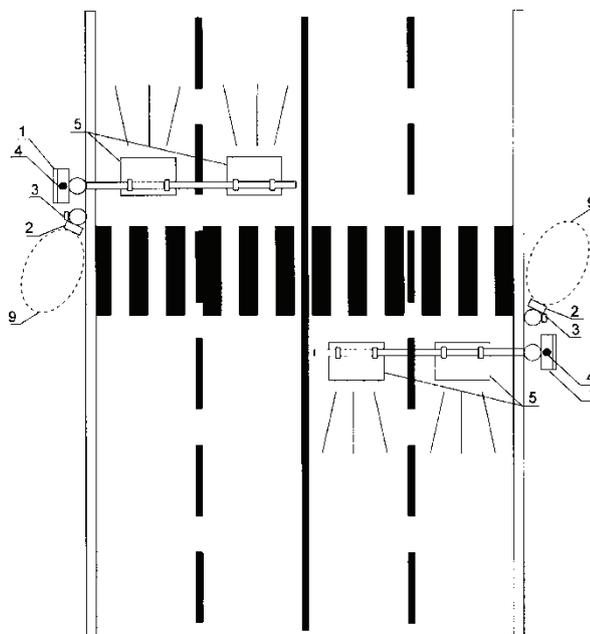


Рисунок 2.
Схема освещения пешеходного перехода

датчик движения (2) и переводит блок управления (1) первого устройства в режим оповещения. При этом включается освещение (5) Одновременно с переходом устройства в режим оповещения блок управления (1) с помощью средства радиосвязи передаёт команду на второе устройство, расположенное на стороне встречного движения с противоположной стороны дороги, переводя его в режим оповещения. Время работы устройства в режиме оповещения зависит от параметров настройки и определяется шириной проезжей части. При появлении пешехода на противоположной стороне дороги первым срабатывает второе устройство и передаёт команду на включение первого устройства.

К системе световой сигнализации можно отнести сигнальные фонари желтого цвета, расположенные над полосами движения транспортных средств на встречу транспортному потоку, включающийся в темное время суток. Область в месте пешеходного перехода должна быть освещена ясным белым светом более высокой интенсивности, обеспечивающая четкое выделение пешеходного перехода на фоне обычного освещения улицы. Силуэт пешехода на переходе вызывает выразительный контраст по сравнению с более темной окружающей средой

В случае необходимости устройство может быть включено в работу нажатием пешеходом на кнопку принудительного включения устройства.

Устройство должно работает в автоматическом режиме. Освещение и сигнализация должны выполняться энергоэффективными светодиодными прожекторами и светильниками, которые включаются в работу лишь при наличии пешехода на пешеходном пере-

ходе. В остальное время устройство находится в системе ожидания.

Аналогичные устройства, позволяющие информировать водителей о нахождении человека на пешеходном переходе, применяются в США, Южной Корее, Италии, Израиле, Чехии, Белоруссии, Казахстане. По данным исследований в США г. Портленд обычный знак «Пешеходный переход» водители игнорируют и пропускают пешеходов только в 15% случаев, после установки аналогичного устройства пешеходов стали пропускать в 85% случаев.

Предлагаемый подход позволит снизить аварийность на неосвещенных участках. Так же экономный режим позволит снизить энергозатраты.

Список литературы:

1. «Обустройство пешеходных переходов» [Электронный ресурс] <http://www.kb-spectech.ru/projects8.html> (дата обращения: 26.04.2016)
2. «Проблемы пешеходов и первоочередные меры для обеспечения безопасности пешеходных переходов» [Электронный ресурс] <http://www.gibdd.ru/mens/interview/pravo-peshekhoda/70114/> (дата обращения: 26.04.2016)
3. «Безопасность пешеходов» [Электронный ресурс] <http://www.gibdd.ru/mens/peshekhodam/> (дата обращения: 26.04.2016)
4. «Система сигнального пешеходного перехода» [Электронный ресурс] <http://www.icrosswalk.ru/signal/system/> (дата обращения: 31.04.2016)
5. «Система освещения пешеходного перехода» [Электронный ресурс] <http://poleznayamodel.ru/model/12/123111.html> (дата обращения: 31.04.2016)

ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СЪЕМОЧНОЙ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ Часть IV.

АРХИПОВ С.А.

ПАО «Красногорский завод им С.А. Зверева»

E-mail: arhipof@zenit-kmz.ru

В четвертой части статьи продолжено обсуждение расчетных методов исследования термостабильности съемочной аппаратуры с точки зрения обратных задач термостабильности. Предложена классификация обратных задач термостабильности. Рассмотрены примеры решения задач методом функциональной аппроксимации с использованием экспресс-оценок.

Ключевые слова: термостабильность, съемочная аппаратура, методы расчета, обратная задача, метод функциональной аппроксимации.

Рассмотренные во второй и третьей частях статьи расчётные методы исследования термостабильности съемочной аппаратуры (СА) и соответствующие им модели отражают причинно-следственные связи физических механизмов влияния тепловых условий эксплуатации СА на ее выходные характеристики. Такого рода постановки задач принято называть прямыми. В отличие от прямых, **обратные задачи** нарушают причинно-следственные связи и, поэтому, не могут быть воспроизведены в физическом эксперименте. Например, нельзя обратить ход теплообменного процесса или, тем более, изменить направление течения времени [1]. Однако, постановка обратных задач актуальна и естественна на всех этапах жизненного цикла создания новых изделий, в том числе и при решении вопросов термостабильности СА. Ведь по крупному счету обратные задачи пытаются ответить на основной вопрос проектирования – как должно быть устроено изделие, чтобы оно удовлетворяло заданным тактико-техническим требованиям.

КЛАССИФИКАЦИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТИ

За основу классификации обратных задач термостабильности СА примем причинно-

следственную схему связи прямых моделей, описывающих термостабильность СА (см. часть II, рис. 1).

В этой схеме последовательно выделены тепловые, механические и оптические модели СА. Соответственно будем различать тепловые, механические и оптические обратные задачи.

Тепловые обратные задачи или **обратные задачи теплового режима** СА или составных частей СА предлагается разделить на следующие группы задач:

- идентификация внешних условий теплообмена (1.1),
- уточнение коэффициентов внутреннего теплообмена (1.2),
- ретроспективное восстановление теплового режима (1.3),
- реставрация пространственного распределения температур (1.4).

Механические обратные задачи или **обратные задачи напряженно-деформированного состояния** (НДС) СА или составных частей СА предлагается разделить на следующие группы задач:

- оценка температурного поля (2.1),
- уточнение термомеханических коэффициентов материалов (2.2).

Оптические обратные задачи или **обратные**

задачи выходных характеристик СА предлагается разделить на следующие группы задач:

- определение взаимных перемещений оптических деталей (3.1),
- определение температурных деформаций оптических деталей (3.2),
- реставрация выходных характеристик (фотограмметрических, пространственно-частотных, спектрорадиометрических) СА (3.3).

Для удобства пользования предложенной классификацией в скобках указан условный номер обратной задачи, в котором первая цифра означает: 1 – задача теплового режима, 2 – задача НДС, 3 – задача выходных характеристик СА; вторая цифра указывает на соответствующую группу.

Обратные задачи теплового режима, НДС, выходных характеристик СА можно объединять в сквозные цепочки, в состав которых можно также частично включать и прямые задачи, и, таким образом формировать различные постановки **проектных задач термостабильности** СА.

НЕКОРРЕКТНОСТЬ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

Прежде чем перейти к обсуждению предложенного списка обратных задач термостабильности СА, целесообразно остановиться на общем ключевом понятии **корректность задачи**. Задача называется корректной [2], если ее решение:

- 1) существует,
- 2) единственно
- 3) является устойчивым.

Для иллюстрации проблем некорректности, возникающих при решении обратных задач, рассмотрим конкретный практический пример. Имеем некий оптический узел (объектив), в котором установлены температурные датчики. Этот объектив помещается во внешние переменные условия теплообмена. Требуется по показаниям температурных датчиков рассчитать динамику и распределение внешних тепловых потоков и температуры окружающей среды.

Очевидно, что в такой общей постановке, без дополнительной априорной информации, не выполняются 2 и 3 условия корректности. Упростим постановку задачи. Допустим, что температурное поле объектива может моделироваться простой прямой задачей. Тело (объектив) с начальной температурой t_0 в момент времени $\tau = 0$ помещено в среду с изменяющейся температурой среды $t_c(\tau)$. Пусть в теле также действует источник тепла мощностью $\Phi(t)$. Требуется определить изменение температуры тела $t(t)$. Если температурное поле тела равномерное, то решение известно [3]:

$$t(\tau) = (t_0 - F_0)e^{-m\tau} + F(\tau) - e^{-m\tau} \int_0^{\tau} e^{m\tau} F'(\tau) d\tau \quad (1)$$

где m – темп, $m = \alpha S/C$,

α – коэффициент теплообмена тела со средой, S – площадь теплообмена,

C – общая теплоемкость тела,

$$F(\tau) = t_c(\tau) + \Phi(\tau)/\alpha S, \quad F_0 = F(\tau=0)$$

Теперь для такой простой модели по известным темпу m и изменению температуры тела $t(\tau)$ потребуем найти, например, температуру среды $t_c(\tau)$ и мощность источника тепла $\Phi(t)$, то есть решить обратную задачу.

Очевидно, что если никаких предположений относительно $t_c(\tau)$ и $\Phi(\tau)$ не сделано, то найти их по отдельности невозможно. Пусть $\Phi(\tau) = 0$. Предположим далее, что $t_c(\tau) = A_0 + A \cos(\omega\tau)$. Тогда решение прямой задачи:

$$t(\tau) = t_0 e^{-m\tau} + A_0(1 - e^{-m\tau}) + A \cos(\omega\tau - \varphi) \cos \varphi - A e^{-m\tau} \cos^2 \varphi$$

где

$$\cos \varphi = m / \sqrt{m^2 + \omega^2}$$

На рис. 1а) представлено это решение для конкретных значений параметров ($m=0,005$ 1/с, $\omega=0,001309$ 1/с, $A_0=1$ К, $A=2$ К, $t_0=4$ К), типичных при оценках термостабильности оптики.

Пусть в некоторые моменты времени τ_1 и τ_2 измерена температура тела. Тогда, зная $t(\tau_1)$ и $t(\tau_2)$, с помощью (1) можно найти два неизвестных параметра A_0 и A , т.е. решить обратную задачу. Запишем (1) в матричной форме.

$$\begin{bmatrix} 1 - e^{-m\tau_1} & \cos(\omega\tau_1 - \varphi)\cos\varphi - e^{-m\tau_1}\cos^2\varphi \\ 1 - e^{-m\tau_2} & \cos(\omega\tau_2 - \varphi)\cos\varphi - e^{-m\tau_2}\cos^2\varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_0 \\ A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t(\tau_1) - t_0 e^{-m\tau_1} \\ t(\tau_2) - t_0 e^{-m\tau_2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Исследуем числа обусловленности *cond* матрицы системы уравнений (3) в зависимости от выбранных τ_1 и τ_2 для полученного конкретного решения (рисунок 1а). Для этого выберем некоторую фиксированную разность, например, $\tau_2 - \tau_1 = 4000$ с и рассчитаем *cond* в евклидовой норме, при различных значениях τ_1 . Результаты расчета представлены на рисунке 1 б). Выберем также некоторый фиксированный момент времени $\tau_1 = 1600$ с и для него рассчитаем *cond* в евклидовой норме, при различных значениях τ_2 . Результаты расчета представлены на рисунке 1 в).

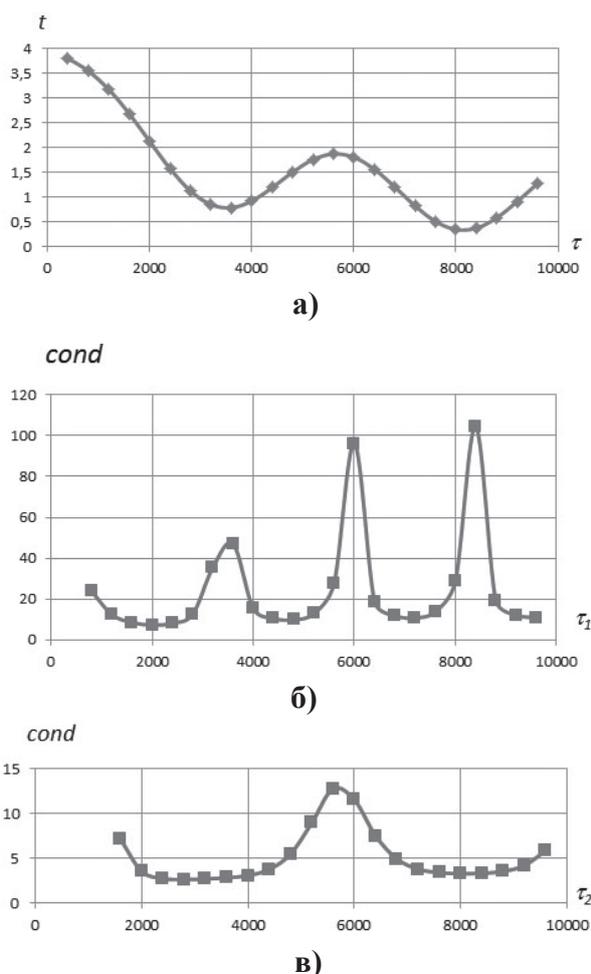


Рисунок 1.
Результаты исследования обусловленности матрицы

Анализ рисунков позволяет сделать следующий ожидаемый вывод. Число обусловленности резко возрастает при близких значениях $t(\tau_1)$ и $t(\tau_2)$, и увеличивается при уменьшении разности $\tau_2 - \tau_1$. Действительно, в таких случаях коэффициенты 1-й и 2-й строк матрицы близки. Напомним, что число *cond* характеризует устойчивость решения задачи и позволяет оценить влияние погрешности измерений $t(\tau_1)$ и $t(\tau_2)$ на погрешность расчета искомых параметров A_0 и A . Так, при обычной для практики погрешности измерения температуры $\sim 0,1$ К и *cond* ~ 10 , погрешность расчета параметров A_0 и A составит ~ 1 К, что, конечно, неудовлетворительно.

Подведем предварительные итоги.

1. Переход от общей постановки задачи к задаче с использованием модели (1) позволил, с одной стороны, однозначно описать внутренний теплообмен в объективе (равномерное температурное поле), с другой стороны однозначно, в функциональной форме задать условия внешнего теплообмена объектива. Такого рода переход мог бы быть сделан и для более сложной тепловой модели объектива, главное, чтобы новая тепловая модель устраняла все неопределенности описания как внутреннего, так и внешнего теплообмена.

2. Однако, даже простая модель (1) не позволила разделить тепловые потоки и внешние температуры и потребовала дальнейшего упрощения $\Phi(t)=0$, что позволило удовлетворить второе условие корректности (единственность решения).

3. Исследование задачи (3) показало, что, даже для этого простого случая, имеет место проблема неприемлемо большой погрешности решения. Для более сложной тепловой модели – это вопрос об удовлетворении 3 условия корректности (устойчивость решения).

4. Для решения обратных задач требуются

специальные методы, обеспечивающие минимизацию погрешности расчета искомых параметров, при наличии погрешностей исходных данных.

Основываясь на практической, инженерной точке зрения, будем различать три группы методов решения некорректных задач:

- методы регуляризации,
- методы функциональной аппроксимации,
- методы фильтрации.

Методы регуляризации [2] позволяют решать обратные задачи максимальной сложности, не упрощая прямую математическую модель. Для этих методов исходные данные (параметры и функции) должны содержать также оценки их погрешностей.

В частности, если обратная задача сводится к плохообусловленной системе линейных уравнений $AX = B$, метод регуляризации А.Н. Тихонова предлагает вместо этого матричного уравнения искать решение эквивалентного уравнения

$$(A^T A + \alpha I)X = A^T B + \alpha X_0 \quad (4)$$

где A – матрица коэффициентов системы уравнений,

AT – транспонированная матрица A ,

X – вектор неизвестных,

X_0 – ожидаемое решение,

B – вектор правой части системы уравнений, заданный с известной погрешностью

$$\|B - B_{\text{точн}}\| < \delta,$$

α – параметр регуляризации.

Вектор неизвестных $X = X_\alpha$ находится из путем многократного решения системы (4) для различных значений α . В качестве решения выбирается X_α , который обеспечивает

$$\|AX_\alpha - B\| \approx \delta.$$

Методы функциональной аппроксимации [4] или, что примерно то же, естественной регуляризации [1] предполагают наличие априорных инженерных знаний, которые позволяют упрощать прямую математическую модель, аппроксимировать, как исходные данные, так и искомое решение, получая количественные оценки «интуитивно ожидаемого» результата.

Для решения обратной задачи методом функциональной аппроксимации целесообразно использовать экспресс-оценки (ЭО), в которых «сконцентрирован» инженерный опыт соответствующей технической науки.

В методах фильтрации предполагается, что исходные данные и искомое решение имеют стохастическую природу. Пусть обратная задача свелась к системе линейных уравнений.

$$AX + v = B \quad (5)$$

где A – $m \times n$ -матрица,

X – искомый n -вектор,

B – измеряемый m -вектор,

v – m -вектор-помеха.

Рассмотрим, следуя [4, 5], схему наиболее популярного метода фильтрации Калмана. Вводятся следующие предположения.

1) Про вектор v известно, что его математическое ожидание равно нулю, т.е. $E[v] = 0$, а также известна симметричная положительно определенная матрица (ковариация ошибок измеряемого вектора B), т.е. $R = E[v v^T]$. Каждый диагональный элемент матрицы R есть квадрат среднеквадратической погрешности измерения, т.е. $R_{ii} = \delta_{ii}^2$, а внедиагональный элемент R_{ij} определяет корреляцию погрешностей v_i и v_j .

2) На первом шаге $k=1$ задан вектор-математическое ожидание (априорная оценка) вектора $X_k = E(X)$, а также симметричная положительно определенная матрица - априорная ковариация ошибок решения

$$P_k = E[(X - X_k)(X - X_k)^T]$$

Оценка искомого решения X_{k+1} (апостериорная оценка) находится из условия минимума квадратичной формы, равной сумме квадратов расстояний Махаланобиса между случайными векторами.

$$(AX - B_k)^T R^{-1} (AX - B_k) + (X - X_k)^T P_k^{-1} (X - X_k) \rightarrow \min_x \quad (6)$$

Минимизируем квадратичную форму (6), и получаем итерационную схему многошагового метода Калмана.

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= X_k + (P_k^{-1} + A^T R^{-1} A)^{-1} A^T R^{-1} (B_k - A X_k) \\ P_{k+1} &= (P_k^{-1} + A^T R^{-1} A)^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

Если ограничиться лишь первым шагом $k=1$ и предположить, что ковариационные матрицы помехи и ошибки решения сводятся к скалярам, т.е. $R = \delta^2 I$ и $P_k = \varepsilon^2 I$, то получим:

$$X_{k+1} = X_k + \left(\frac{\delta^2}{\varepsilon^2} I + A^T A \right)^{-1} A^T (B_k - A X_k) \quad (8)$$

Из формулы (4), подставив в нее $X_0 - X_0$, получим:

$$\begin{aligned} X &= X_0 + (\alpha I + A^T A)^{-1} (A^T B + \alpha X_0) - X_0 \\ X &= X_0 + (\alpha I + A^T A)^{-1} A^T (B - A X_0) \end{aligned} \quad (9)$$

Сравнивая (8) с (9), видим, что метод Тихонова и одношаговый метод Калмана дают одинаковые решения при $\alpha = \delta^2 / \varepsilon^2$. Достоверность метода фильтрации возрастает за счет многократных измерений параметров B_k , результаты которых позволяют на каждом последующем шаге уточнять ковариационную матрицу P_{k+1} .

В настоящей статье для исследования обратных задач термостабильности СА выбран метод функциональной аппроксимации. Предлагается в рамках в рамках этого метода использовать экспресс-оценки (ЭО, см. часть III), что позволяет получать эффективные эвристические решения.

$$\frac{mc}{F} \cdot \frac{dT}{dt} = q_c A_s + q_{co} A_s \varphi_{k-3} + q_3 \varepsilon \varphi_{k-3} + \sum_k Q_{k-k} + \sum_i Q_{k-i} + Q_{k-KA} - \varepsilon \sigma T^4 \quad (11)$$

где q_c – плотность потока солнечного излучения,

q_{co} – плотность потока отраженного от Земли солнечного излучения,

q_3 – плотность потока излучения Земли,

Q_{k-KA} – тепловой поток от элементов конструкции КА,

Q_{k-k} – тепловой поток от элементов внешней поверхности СА,

Q_{k-i} – тепловой поток от внутренних элементов СА,

σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67$

В заключение раздела завершим решение примера (1) с помощью метода функциональной аппроксимации. Для этого используем допущение о том, что известна функциональная форма изменения температуры окружающей среды (косинусоида). Коэффициенты A_0 и A определим методом наименьших квадратов (МНК), который позволяет минимизировать влияние ошибок измерения $t(\tau)$. Разрешающая система уравнений

$$D^T D \begin{bmatrix} A_0 \\ A \end{bmatrix} = D^T B \quad (10)$$

здесь D – прямоугольная матрица ($2 \times n$), составленная из строк аналогичных строкам матрицы (3), полученных для моментов времени $\tau_1, \tau_2 \dots \tau_n$,

B – столбец, аналогичный столбцу (3), полученный для моментов времени $\tau_1, \tau_2 \dots \tau_n$.

Для матрицы $D^T D$ число обусловленности $cond \sim 12$. При погрешности измерения температуры $\sim 0,1K$, для числа измерений $n=22$ за счет усреднения МНК погрешность расчета параметров A_0 и A не превосходит $0,01K$, что вполне удовлетворительно.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ ТЕПЛООБМЕНА

Напомним (см. часть II, формула 1), что теплообмен элемента внешней поверхности СА определяется уравнением теплового баланса:

10^{-8} Вт/($m^2 K^4$), для k -го элемента внешней поверхности:

T – абсолютная температура элемента,

m – масса,

c – удельная теплоемкость,

F – площадь,

A_s – коэффициент поглощения солнечного излучения,

ε – степень черноты,

φ_{k-3} – коэффициент облученности элемента Землей.

Постановка обратной задачи идентификации внешнего теплообмена СА предполагает, что неизвестными в уравнении (11) являются внешние тепловые потоки и радиационные свойства (A_s, ε) поверхности СА. Все остальные параметры и функции уравнения (11) предполагаются заданными, в том числе и температуры элементов внешней поверхности T . Степень сложности модели внешнего теплообмена или «подробность» разбиения на элементарные площадки внешней поверхности СА и, соответственно, число уравнений (11) определяют степень сложности обратной задачи идентификации внешнего теплообмена СА.

Предположим, что мы решаем обратную задачу максимальной сложности с неточно заданными исходными данными, не сделав никаких предположений относительно искомого решения. Предположим также, что на известную температуру T_0 наложена неизвестная малая ошибка измерения гармонического характера.

$$T = T_0 + B \sin \omega \tau \quad (12)$$

Для решения обратной задачи исходные данные, в том числе (12), подставляем в (11).

При этом требуется вычислить производную dT/dt , значение которой при $\omega \rightarrow \infty$, (даже при малой амплитуде B), неограниченно возрастает, что приводит к бесконечной ошибке в определении внешних тепловых потоков. Это означает, что обратная задача неустойчива, т.е. нарушается второе условие корректности.

С помощью метода функциональной аппроксимации можно получить различные упрощенные постановки обратной задачи 1.1, среди которых выделим три основных:

- определение динамики изменения тепловых потоков и температуры окружающей среды, при упрощенном моделировании их распределении по поверхности СА (задача 1.1.1)
- определение распределения тепловых потоков по поверхности СА, при упрощенном описании их изменения во времени (задача 1.1.2)

– определение равновесной температуры СА, с учетом нелинейности внешнего лучистого теплообмена (задача 1.1.3) по предельно простой стационарной модели.

Далее рассмотрим примеры решения перечисленных задач более подробно, используя экспресс-оценки (ЭО). ЭО по существу являются квинтэссенцией метода функциональной аппроксимации. Они позволяют максимально упростить задачу и определить существенные количественные соотношения.

Задача 1.1.1 Решение этой задачи с использованием простейшей ЭО – изменение температуры тела, температурное поле которого равномерно – было рассмотрено выше. Рассмотрим другую постановку задачи с использованием ЭО – модель неограниченного полупространства.

Положим, что на полупространство действует гармонический тепловой поток с плотностью $q = A \cos(\omega t)$. Установившееся температурное поле в полупространстве подчиняется зависимости [6]

$$\vartheta(x, \tau) = \frac{A}{\sqrt{\lambda c \rho \omega}} \exp\left(-x \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \cos\left(\omega \tau - \frac{\pi}{4} - x \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \quad (13)$$

здесь λ – теплопроводность, c – удельная теплоемкость, ρ – плотность, a – температуропроводность.

Это готовое решение прямой задачи можно использовать для нахождения параметров A и ω теплового потока. Измеряем колебания температуры на глубине $x=l$, аппроксимируем результаты измерения косинусоидой, находим частоту ω и амплитуду ϑ_l . Из формулы (13) следует

$$A = \vartheta_l \sqrt{\lambda c \rho \omega} \exp\left(l \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \quad (14)$$

Пусть $\lambda = 1,6$ Вт/м К, $c = 920$ Дж/кг К, $\rho = 2500$ кг/м³, $a = 0,71 \cdot 10^{-8}$ м²/с, $l = 0,01$ м, $\omega = 0,001308$ с⁻¹. Это соответствует полупространству из ситалла, в котором на глубине 0,01 м размещен температурный датчик. Тогда $A = 93 \vartheta_l$.

Если погрешность измерения температуры 0,1К, то погрешность определения потока ~

9,3 Вт/м². Очевидно, что для уменьшения этой погрешности необходимо аппроксимировать результаты измерения температуры методом наименьших квадратов (МНК).

Задача 1.1.2 Рассмотрим пример. Пусть на часть некоторой детали (это может быть корпус или зеркало, см. рис. 2) падает равномерный тепловой поток q .

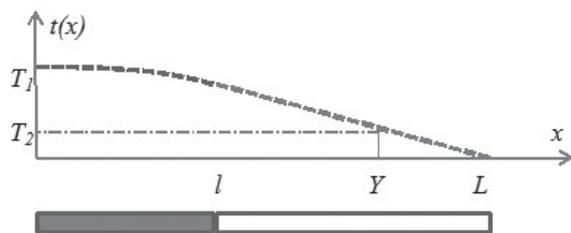


Рисунок 2.

Положим, что тепловую модель можно описать стержнем длиной L , сечением F , теплопроводностью λ на длине l которого действует тепловой поток q (на рис. 2 эта часть стержня закрашена). С противоположной стороны стержень имеет нулевую температуру (граничные условия 1-го рода). В такой постановке стационарное температурное поле стержня легко найти:

$$t(x) = \frac{qF}{2\lambda} [l(2L-l) - x^2] \quad , \quad \text{при } 0 < x < l$$

$$t(x) = \frac{qF}{\lambda} l(L-x) \quad , \quad \text{при } l < x < L$$

(15)

Следствием простого решения прямой задачи является возможность получить про-

стое решение обратной задачи. Разместив температурные датчики в точках $x=0$, $x=Y$ и измерив $T_1 = t(0)$ и $T_2 = t(Y)$, получаем искомые параметры q и l , характеризующие пространственное распределение теплового потока.

$$l = 2L - 2 \frac{T_1}{T_2} (L - Y)$$

$$q = \frac{T_2 \lambda}{Fl(L - Y)}$$

(16)

Задача 1.1.3 Оценка стационарной равновесной температуры T элемента внешней поверхности СА, с учетом нелинейности внешнего лучистого теплообмена, весьма полезна для последующего анализа внутреннего теплообмена.

Для стационарного случая уравнение (11) запишется в виде

$$\sigma T^4 + \frac{T}{R} = \frac{T_{CA}}{R} + Q_{ИК} + \frac{A_s}{\varepsilon} Q_{ВД} \quad (17)$$

где T_{CA} – температура СА,

R – тепловое сопротивление между СА и элементом,

$Q_{ИК}$ – сумма тепловых потоков ИК диапазона, падающих на элемент,

$Q_{ВД}$ – сумма тепловых потоков ВД диапазона, падающих на элемент.

Аппроксимируя нелинейную зависимость T^4 параболой, получим оценку решения уравнения (17).

$$T = -20,64 \left(\frac{1}{R} - 8,52 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{R} - 8,52 \right)^2 - 0,097 \left(\frac{T_{CA}}{R} + Q_{ИК} + \frac{A_s}{\varepsilon} Q_{ВД} \right)} \quad (18)$$

Формула (18) обеспечивает погрешность расчета T не более 1 % в диапазоне температур от -50 до +50 °С.

УТОЧНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛООБМЕНА

Напомним (см. часть II, формула 2), что внутренний теплообмен СА, описывается системой уравнений теплового баланса.

$$m_i c_i \cdot \frac{dT_i}{dt} + \sum_j \sigma_{i-j} (T_i - T_j) + \sum_{\kappa} Q_{\kappa-i} + W_i = 0 \quad (19)$$

где: $i=1 \dots N$ – номер узла (элемента), j – номер другого узла,

для i -го узла:

T_i – абсолютная температура,

m_i – масса,

c_i – удельная теплоемкость,

σ_{i-j} – тепловая проводимость между i -м и j -м узлами,

$Q_{\kappa-i} = \sigma_{\kappa-i} (T_i - T_{\kappa})$ – тепловой поток между κ -м элементом внешней поверхности СА и i -м элементом конструкции СА,

W_i – тепловыделения.

Необходимость уточнения коэффициентов σ_{i-j} внутреннего теплообмена СА в условиях эксплуатации обусловлена наличием в конструкции СА контактных тепловых сопротивлений, величина которых возрастает в условиях глубокого вакуума, а также возможной деградацией радиационных коэффициентов покрытий.

В работе [8] рассмотрены различные методы уточнения параметров тепловой модели, аналогичной (19), в т.ч. одношаговый МНК для двух вариантов (минимизация остаточных тепловых потоков и минимизация разности между расчетными и измеренными температурами) и метод фильтрации Калмана. В сравнении с ними предлагаемый метод функциональной аппроксимации позволяет с меньшими затратами получать ожидаемые результаты.

Задача 1.2

Рассмотрим вначале простейший случай. Тело, имеющее теплоемкость C , начальную температуру ϑ , поместили в момент времени $\tau=0$ в среду с нулевой температурой. Тепловое сопротивление R между телом и средой известно приблизительно. По результатам измерения температуры тела требуется уточнить R . Прямая задача

$$C \frac{dt}{d\tau} + \frac{1}{R} t = 0, \quad t(\tau=0) = \vartheta \quad (20)$$

имеет решение [3]

$$t(\tau) = \vartheta \cdot \exp\left(-\frac{1}{CR} \tau\right) \quad (21)$$

из которого, измерив температуру t_1 в некоторый момент времени τ_1 , находим

$$-\frac{1}{CR} = \frac{1}{\tau_1} \ln\left(\frac{t_1}{\vartheta}\right)$$

Недостаток этой формулы – необходимость отсчитывать время τ_1 от начального момента времени $\tau=0$ – можно преодолеть, сделав два последовательных измерения температур t_1 и t_2 в моменты времени τ_1 и τ_2 .

$$-\frac{1}{CR} = \frac{\ln\left(\frac{t_2}{\vartheta}\right) - \ln\left(\frac{t_1}{\vartheta}\right)}{\tau_2 - \tau_1} \quad (22)$$

Однако, если τ_0 и τ_1 близки (например: $\tau_1 - \tau_0 = 360$ с, для типичного случая $C = 10000$ Дж/К, $\vartheta = 10$ К, $\tau_0 = 3600$ с, $R \sim 0,5$ К/Вт), то погрешность измерения температур t_0 и t_1 величиной 0,05 К вызывает погрешность определения R по формуле (22) $\delta R/R$ до 40%, что, конечно же не удовлетворительно.

Выход из ситуации – функциональная аппроксимация. Число последовательных измерений увеличиваем до n , а результаты измерений усредняем, исходя из того, что логарифм температурной кривой аппроксимируется прямой линией. Тогда формула (22) запишется

$$-\frac{1}{CR} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\ln\left(\frac{t_{i+1}}{\vartheta}\right) - \ln\left(\frac{t_i}{\vartheta}\right)}{\tau_{i+1} - \tau_i} \quad (23)$$

Уже для $n=6$ погрешность идентификации R не превышает 6%.

Теперь рассмотрим более сложный случай. Пусть N тел находятся в условиях линейного теплообмена, который описывается системой уравнений теплового баланса (19). Полагаем, что тепловые проводимости известны приблизительно, теплоемкости тел известны точно, имеется возможность измерения температур тел.

Такая постановка задачи вполне соответ-

ствуется реальной ситуации. Опишем ее. Имеется некоторая конструкция СА, на элементы которой наклеены температурные датчики и термонагреватели. Тепловые связи между элементами конструкции при переходе от наземных условий к штатным условиям эксплуатации изменяются (вакуум, деградация радиационных характеристик поверхностей). Требуется уточнить тепловые проводимости.

Предлагается следующая последовательность действий. Создадим в СА неравномерное температурное поле. Это можно сделать за счет внутренних тепловыделений W_i , например, включая термонагреватели. В момент времени $\tau = 0$ термонагреватели выключаем. СА остывает, находясь в теплообмене с более холодной платформой КА. Измеряем динамику температур элементов конструкции СА. Далее покажем, как по результатам измерений температур можно уточнить тепловые проводимости.

$$\frac{d}{d\tau} \begin{pmatrix} t_1(\tau) \\ t_2(\tau) \\ \dots \\ t_N(\tau) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t_1(\tau) \\ t_2(\tau) \\ \dots \\ t_N(\tau) \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t_1(0) \\ t_2(0) \\ \dots \\ t_N(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \dots \\ \vartheta_N \end{pmatrix} \quad (25)$$

Кратко

$$\frac{d}{d\tau} \mathbf{t}(\tau) = [A] \cdot \mathbf{t}(\tau) \quad \mathbf{t}(\tau = 0) = \vartheta$$

Решение прямой задачи для однородной системы обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами (25) можно получить алгебраическим методом [9].

$$\mathbf{t}(\tau) = \mathbf{e}^{[A]\tau} \vartheta \quad \text{или} \\ t_i(\tau) = \sum_{j=1}^N B_{ij} e^{\alpha_j \tau} \quad (26)$$

Корни α_i выражаются через коэффициенты матрицы A , постоянные B_{ij} выражаются через корни α_i и начальные перегревы ϑ_i .

Пусть температуры измеряются в моменты времени $\tau = \Delta k$, где $k = 0, 1, \dots, K$, с интервалом Δ .

В основу решения обратной задачи – опре-

Для данного случая система уравнений (19) с начальными условиями принимает вид

$$m_i c_i \cdot \frac{dt_i}{d\tau} + \sum_j \sigma_{i-j} (t_i - t_j) + \sigma_{i-c} t_i = 0, \\ t_i(\tau = 0) = \vartheta_i \quad (24)$$

где: t_i – перегрев i -го узла (элемента конструкции) относительно температуры платформы КА, которую положим $t_{KA} = t_c = 0$,

σ_{i-c} – тепловая проводимость между i -ым узлом и средой,

ϑ_i – начальный перегрев i -го узла.

Введем новые обозначения

$$a_{ii} = -\frac{\sum_j \sigma_{i-j} + \sigma_{i-c}}{m_i c_i}, \quad a_{ij} = \frac{\sigma_{i-j}}{m_i c_i}$$

и запишем систему уравнений (24) и начальные условия в матричной форме

деление α_i и B_{ij} по измеренным температурам $t[k]$ – положим метод Прони обнаружения параметров многоэкспоненциальных кривых релаксации [10,11]. Последовательно запишем первую строку уравнения (26) для каждого измерения температуры узла $i=1$ в форме прямоугольной матрицы.

$$\begin{pmatrix} t_1[0] \\ t_1[1] \\ \dots \\ t_1[K] \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1^0 & Z_2^0 & \dots & Z_N^0 \\ Z_1^1 & Z_2^1 & \dots & Z_N^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_1^K & Z_2^K & \dots & Z_N^K \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_{11} \\ B_{12} \\ \dots \\ B_{1N} \end{pmatrix} \quad (27)$$

Здесь члены $e^{\alpha_j \Delta k}$ обозначены как Z_j^k . Целая переменная $K \geq 2N-1$ обозначает число измерений температур.

Суть метода Прони заключается в возможности нахождения Z_j независимо от B_{ij} . Для этого вводится интерполяционный полином, нулями которого являются Z_j

$$F(Z) = \prod_{j=1}^N (Z - Z_j) = b[N]Z^N + b[N-1]Z^{N-1} + \dots + b[0] = \sum_{n=0}^N b[n]Z^n \quad (28)$$

при этом $b[N]=1$.

Умножим первое уравнение системы (27) на $b[0]$, второе уравнение на $b[1]$, $N+1$ уравнение на $b[N]$ и сложим их.

$$\sum_{n=0}^N t_1[n]b[n] = B_{11} \sum_{n=0}^N b[n]Z_1^n + B_{12} \sum_{n=0}^N b[n]Z_2^n + \dots + B_{1N} \sum_{n=0}^N b[n]Z_N^n = \sum_{j=1}^N B_{1j} \sum_{n=0}^N b[n]Z_j^n = 0$$

Правая часть равна нулю в силу того, что

$$\sum_{n=0}^N b[n]Z_j^n = F(Z_j) = 0$$

Теперь сдвинем каждый коэффициент вниз на одно уравнение системы (27) и, повторив процесс, найдем

$$\sum_{n=0}^N t_1[n+1]b[n] = \sum_{j=1}^N B_{1j} Z_j \sum_{n=0}^N b[n]Z_j^n = 0$$

Если проделать все это N раз, то получится система линейных уравнений относительно $b[n]$ ($n=0,1,\dots,N-1$)

$$\sum_{n=0}^N t_1[n+m]b[n] = 0, \quad m = 0,1,\dots,N-1 \quad (29)$$

или в матричной форме

$$\begin{bmatrix} t_1[0] & t_1[1] & \dots & t_1[N-1] & t_1[N] \\ t_1[1] & t_1[2] & \dots & t_1[N] & t_1[N+1] \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_1[N-1] & t_1[N] & \dots & t_1[2N-2] & t_1[2N-1] \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b[0] \\ b[1] \\ \dots \\ b[N] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}$$

С учетом того, что $b[N]=1$

$$\begin{bmatrix} t_1[0] & t_1[1] & \dots & t_1[N-1] \\ t_1[1] & t_1[2] & \dots & t_1[N] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_1[N-1] & t_1[N] & \dots & t_1[2N-2] \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b[0] \\ b[1] \\ \dots \\ b[N-1] \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} t_1[N] \\ t_1[N+1] \\ \dots \\ t_1[2N-1] \end{pmatrix} \quad (30)$$

Решив эту систему, определим коэффициенты $b[n]$.

Заметим, что если число измерений температур $K > 2N-1$, то матрица уравнения (30) становится преопределенной и решение можно найти с помощью метода наименьших квадратов.

Далее определяем корни Z интерполяционного полинома (28).

Затем, решая систему (27), определяем коэффициенты B_{ij} .

Таким образом мы определили α_i и B_{ij} для первой строки уравнения (26).

Аналогично можно повторить все проделанные операции для 2, 3, ..., N строк уравнения (26), тем самым полностью решить поставленную обратную задачу методом Прони.

Предлагается усовершенствованный метод решения обратной задачи, который минимизирует влияние ошибок измерения температур. Объединяем уравнения (30) для всех строк

$$\begin{bmatrix} t_1[0] & t_1[1] & \dots & t_1[N-1] \\ t_1[1] & t_1[2] & \dots & t_1[N] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_1[N-1] & t_1[N] & \dots & t_1[2N-2] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_N[0] & t_N[1] & \dots & t_N[N-1] \\ t_N[1] & t_N[2] & \dots & t_N[N] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_N[N-1] & t_N[N] & \dots & t_N[2N-2] \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b[0] \\ b[1] \\ \dots \\ b[N-1] \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} t_1[N] \\ t_1[N+1] \\ t_1[2N-1] \\ \dots \\ t_N[N] \\ t_N[N+1] \\ \dots \\ t_N[2N-1] \end{pmatrix} \quad (31)$$

Решаем эту систему методом наименьших квадратов и определяем коэффициенты $b[n]$.

Далее определяем корни Z интерполяционного полинома (28).

Затем N раз решаем систему (26) для различных узлов и находим коэффициенты B_{ij} .

Для иллюстрации предложенного метода решим конкретную задачу для трех тел (1-е зеркало, 2-е зеркало, корпус). Заданы массы и удельные теплоемкости: $m_1 c_1 = 0,8 \cdot 10^5$ Дж/К, $m_2 c_2 = 0,1 \cdot 10^5$ Дж/К, $m_3 c_3 = 1,0 \cdot 10^5$ Дж/К. Теплопроводности: $\sigma_{12} = \sigma_{21} = 0,4$ Вт/К, $\sigma_{13} = \sigma_{31} = 20,0$ Вт/К, $\sigma_{32} = \sigma_{23} = 8,0$ Вт/К, $\sigma_{1c} = 4,0$

Вт/К, $\sigma_{2c} = 1,0$ Вт/К, $\sigma_{3c} = 10,0$ Вт/К. Начальные перегревы: $\vartheta_1 = 4,0$ К, $\vartheta_2 = 2,0$ К, $\vartheta_3 = 8,0$ К.

Система уравнений (25) в этом случае имеет вид

$$\frac{d}{d\tau} \mathbf{t}(\tau) = \begin{bmatrix} -3,1 \cdot 10^{-4} & 0,05 \cdot 10^{-4} & 2,5 \cdot 10^{-4} \\ 0,4 \cdot 10^{-4} & -9,4 \cdot 10^{-4} & 8,0 \cdot 10^{-4} \\ 2,0 \cdot 10^{-4} & 0,8 \cdot 10^{-4} & -3,8 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{t}(\tau)$$

$$\mathbf{t}(\tau=0) = \vartheta = [4,0 \quad 2,0 \quad 8,0]^T \quad (32)$$

Решение этой системы можно получить алгебраическим методом (методом Эйлера) [9]. Находим корни характеристического полинома

$$\alpha_1 = -10,4757 \cdot 10^{-4} \quad \alpha_2 = -0,8219 \cdot 10^{-4} \quad \alpha_3 = -4,9524 \cdot 10^{-4}$$

Находим собственные векторы матрицы $[A]$

$$\begin{pmatrix} V_1^{(1)} \\ V_2^{(1)} \\ V_3^{(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,03870 \\ 1,0 \\ -0,13495 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} V_1^{(2)} \\ V_2^{(2)} \\ V_3^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,21245 \\ 1,0 \\ 1,06059 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} V_1^{(3)} \\ V_2^{(3)} \\ V_3^{(3)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,76917 \\ 1,0 \\ 0,56531 \end{pmatrix}$$

Из начальных условий определяем произвольные постоянные

$$P_1 = -6,07987 \quad , \quad P_2 = 5,27352 \quad , \quad P_3 = 2,80635$$

И получаем решение прямой задачи

$$\begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 V_1^{(1)} e^{\alpha_1 \tau} + P_1 V_1^{(2)} e^{\alpha_2 \tau} + P_1 V_1^{(3)} e^{\alpha_3 \tau} \\ P_1 V_2^{(1)} e^{\alpha_1 \tau} + P_1 V_2^{(2)} e^{\alpha_2 \tau} + P_1 V_2^{(3)} e^{\alpha_3 \tau} \\ P_1 V_3^{(1)} e^{\alpha_1 \tau} + P_1 V_3^{(2)} e^{\alpha_2 \tau} + P_1 V_3^{(3)} e^{\alpha_3 \tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,2353 e^{\alpha_1 \tau} + 6,3939 e^{\alpha_2 \tau} - 2,8063 e^{\alpha_3 \tau} \\ -6,0799 e^{\alpha_1 \tau} + 5,2735 e^{\alpha_2 \tau} + 2,8063 e^{\alpha_3 \tau} \\ 0,82049 e^{\alpha_1 \tau} + 5,5930 e^{\alpha_2 \tau} + 1,5864 e^{\alpha_3 \tau} \end{bmatrix}$$

Температурные кривые изображены на рисунке 3

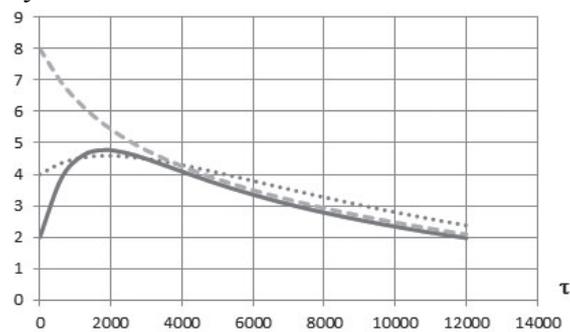


Рисунок 3.
Температурные кривые
в задаче остывания трех тел

Продemonстрируем решение обратной задачи предложенным методом. Будем предполагать, что температуры тел измерены. Для этого воспользуемся полученным результатом решения прямой задачи. Рассчитанные температуры тел выберем с шагом 600 с, округлим их с погрешностью 0,001К. Число измерений $K=9$. Тогда система уравнений (30) относительно коэффициентов $b[0]$, $b[1]$, $b[2]$ запишется следующим образом:

$$\begin{bmatrix}
 4 & 4,357 & 4,535 \\
 4,357 & 4,535 & 4,594 \\
 4,535 & 4,594 & 4,573 \\
 4,594 & 4,573 & 4,498 \\
 4,573 & 4,498 & 4,388 \\
 4,498 & 4,388 & 4,255 \\
 4,388 & 4,255 & 4,108 \\
 4,255 & 4,108 & 3,953 \\
 4,108 & 3,953 & 3,794 \\
 2 & 3,862 & 4,598 \\
 3,862 & 4,598 & 4,777 \\
 4,598 & 4,777 & 4,692 \\
 4,777 & 4,692 & 4,494 \\
 4,692 & 4,494 & 4,255 \\
 4,494 & 4,255 & 4,01 \\
 4,255 & 4,01 & 3,775 \\
 4,01 & 3,775 & 3,556 \\
 3,775 & 3,556 & 3,353 \\
 8 & 6,94 & 6,177 \\
 6,94 & 6,177 & 5,599 \\
 6,177 & 5,599 & 5,142 \\
 5,599 & 5,142 & 4,765 \\
 5,142 & 4,765 & 4,446 \\
 4,765 & 4,446 & 4,169 \\
 4,446 & 4,169 & 3,922 \\
 4,169 & 3,922 & 3,701 \\
 3,922 & 3,701 & 3,499
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 b[0] \\
 b[1] \\
 b[2]
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 -4,594 \\
 -4,573 \\
 -4,498 \\
 -4,388 \\
 -4,255 \\
 -4,108 \\
 -3,953 \\
 -3,794 \\
 -3,635 \\
 -4,777 \\
 -4,692 \\
 -4,494 \\
 -4,255 \\
 -4,01 \\
 -3,775 \\
 -3,556 \\
 -3,353 \\
 -3,166 \\
 -5,599 \\
 -5,142 \\
 -4,765 \\
 -4,446 \\
 -4,169 \\
 -3,922 \\
 -3,701 \\
 -3,499 \\
 -3,313
 \end{bmatrix}$$

Решаем ее методом наименьших квадратов и получаем коэффициенты полинома (28)

$$b[0] = -0,377714 \quad b[1] = 1,612600 \quad b[2] = -2,291313$$

Определяем корни полинома (28)

$$Z_1 = 0,533567 \quad Z_2 = 0,951861 \quad Z_3 = 0,743704$$

По формуле

$$\alpha_j = \frac{1}{600} \ln Z_j \quad (34)$$

находим $\alpha_1 = -10,4695 \cdot 10^{-4}$, $\alpha_2 = -0,8223 \cdot 10^{-4}$, $\alpha_3 = -4,9352 \cdot 10^{-4}$, которые с погрешностью не более 0,5% совпадают с корнями характеристического полинома из прямой задачи.

Решая систему (27) определяем коэффициенты B_{ij}

$$\begin{pmatrix} -0,24115 & 6,39781 & -2,15675 \\ -6,07806 & 5,27027 & 2,80792 \\ 0,826566 & 5,59273 & 1,580694 \end{pmatrix}$$

которые не более чем на 2,5% отклоняются от прямого решения.

Дальнейшую схему уточнения тепловых проводимостей предлагается строить на исследовании чувствительности решения прямой задачи к изменениям тепловых проводимостей. Демонстрируем эти действия на рассмотренном примере. В табл. 1 приведены результаты расчета изменений (в %) корней характеристического уравнения в зависимости от однофакторного уменьшения тепловых проводимостей на 10 %.

Сравниваем решения прямой задачи и обратной задачи по измеренным температурам, определяем рассогласование корней характеристического уравнения. Например, известно, что изменилась тепловая проводимость σ_{13} , при сохранении остальных проводимостей. Рассчитав рассогласование корней характеристического уравнения и взяв их отношения, убеждаемся в этом априорном предположении, когда отношения должны составить 1 : 24 : - 12,8. И далее можем пропорционально оценить величину уменьшения σ_{13} . В случае, если известно, что уменьшения тепловых проводимостей многофакторное,

исследуем изменение корней характеристического уравнения прямой задачи для выбранной многофакторной модели и далее поступаем аналогично.

РЕТРОСПЕКТИВНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

Такого рода обратные задачи могут возникнуть, если по каким-либо причинам система контроля температуры СА отключалась и требуется восстановить температурный режим СА именно в этот промежуток времени.

Задача 1.3

Рассмотрим простейшую задачу остывания тела изначально перегретого на некоторую температуру ϑ_0 . Общее решение имеет вид

$$t(\tau) = C \cdot e^{-m\tau}$$

здесь m – темп остывания, C – произвольная постоянная, определяемая начальными условиями.

Пусть известен перегрев $\vartheta(\tau_0)$ тела в некоторый момент времени τ_0 . Тогда

$$t(\tau) = \vartheta(\tau_0) \cdot e^{m(\tau_0 - \tau)}$$

или

$$t(T - \eta) = \vartheta(T) \cdot e^{m\eta} \quad (35)$$

Новая переменная времени $T - \eta$ изменяется в диапазоне от T до 0 и представляет обратный отсчет времени от момента $\tau = T$. Формула (35) позволяет рассчитывать температуру тела вплоть до момента времени $\tau = 0$. По умолчанию принимается допущение о неизменности тепловой модели задачи, т.е. предполагается отсутствие внешних воздействий и сохранность коэффициентов теплообмена, которые выражает темп.

Из формулы (35) видно, что задача вычисления температуры $t(T - \eta)$ становится суще-

Таблица 1.

Изменения, %	σ_{12}	σ_{13}	σ_{23}	σ_{1c}	σ_{2c}	σ_{3c}
α_1	0,8	0,8	-7,0	1,3	0,3	0,3
α_2	21,6	30,5	17,0	21,8	19,3	1,5
α_3	-6,3	-16,0	-5,8	-7,4	-5,8	-2,8

ственно неустойчивой, когда $m\eta > 2$, т.е. погрешность определения температуры $t(T-\eta)$ возрастает относительно погрешности изменения температуры $\vartheta(T)$ более чем в e^2 раз.

Аналогичный простой критерий оценки неустойчивости задачи 1.3 для общей модели (25), решение которой сводится к решению системы линейных уравнений, может быть получен с помощью формулы кругов Гершгорина [12].

$$|a_{ii} - \alpha| \leq \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |a_{ij}|, \quad i = 1, \dots, n \quad (36)$$

Среди всех кругов (интервалов для вещественных корней) находим тот, левая граница которого наиболее удалена от мнимой оси в отрицательную полуплоскость на величину M . Критерий оценки неустойчивости

$$M\eta > 2 \quad (37)$$

указывает для данной модели практическую границу, за которой ретроспективное восстановление теплового режима существенно неустойчиво.

Оценим границу неустойчивости для ранее рассмотренной модели трех тел. Для этого в системе уравнений (32) для каждой строки суммируем абсолютные величины всех коэффициентов и находим среди этих сумм максимальное значение. Получаем максимальное значение для второй строки $M=17,8 \cdot 10^{-4}$ с.

Таким образом граница устойчивости восстановления теплового режима $17,8 \cdot 10^{-4}\eta > 2$, то есть при $\eta > 600$ с погрешность определения температур тел на порядок больше погрешности измерения их температур при $\eta=0$.

Корректное решение задачи 1.3 при $M\eta > 2$ возможно получить методом функциональной аппроксимации, за счет привлечения дополнительной информации о тепловом режиме в восстанавливаемой области (информация о начальных условиях, внешних воздействиях, коэффициентах тепловой модели, какая-либо информация об искомым функциях температур).

РЕСТАВРАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР

Задача реставрации пространственного распределения температур аналогична решению прямой задачи определения теплового режима СА. Однако, на этапах наземных испытаний и штатной эксплуатации кроме прямого математического моделирования теплового режима СА, проводится непосредственное измерение поля температур СА, что позволяет с большей достоверностью определять тепловой режим СА.

Задача 1.4

Рассмотрим тепловую модель СА и результаты температурных измерений. Обычно тепловая модель СА строится методом поэтапного моделирования [3]. Пространственная сложность конструкции СА, сложность описания лучистого теплообмена в СА, содержащей зеркальные и прозрачные оптические элементы с переменными по спектру радиационными характеристиками поверхностей, требуют принятия многочисленных допущений, осреднений теплофизических свойств элементов конструкции СА и позволяют построить лишь в некоторой степени адекватную тепловую модель. С другой стороны, измерение температурного поля невозможно в каждой точке конструкции СА, установка температурных датчиков на рабочих оптических поверхностях вообще исключена. Т.о. температурные измерения также не дают полной информации о реальном пространственном распределении температур. С учетом этих противоречий задачу 1.4 предлагается рассматривать как одну из обратных задач термостабильности. Ее решение предлагается получать совместным применением метода поэтапного моделирования и метода функциональной аппроксимации.

Рассмотрим пример, проиллюстрированный на рисунке 4. Были рассчитаны температуры системы тел:

- на 1-м этапе $t_1(\tau)$ и $t_2(\tau)$ для двух эффективных тел;

- на 2-м этапе $t_{21}(t)$ и $t_{22}(t)$ еще для двух эффективных тел, из которых составлено тело 2, при этом $t_1(\tau)$ использовалась в качестве граничного условия;

- на 3-м этапе $t_{221}(\tau)$ и $t_{222}(\tau)$ еще для двух эффективных тел, из которых составлено тело 22, при этом $t_{21}(\tau)$ использовалась в качестве граничного условия.

Измерялась температура тела 21, которую обозначим $t_u(\tau)$.

Рассогласование температур $t_{21}(\tau)$ и $t_u(\tau)$ объясняется тем, что тело 21 имеет конечную теплопроводность и, соответственно, его температурное поле неоднородно, при этом температур $t_{21}(\tau)$ - среднеобъемная температура, $t_u(\tau)$ - среднеповерхностная температура. Поэтому расчет на 3-м этапе должен быть повторен с новым граничным условием, в качестве которого необходимо принять температуру на поверхности тела 21.

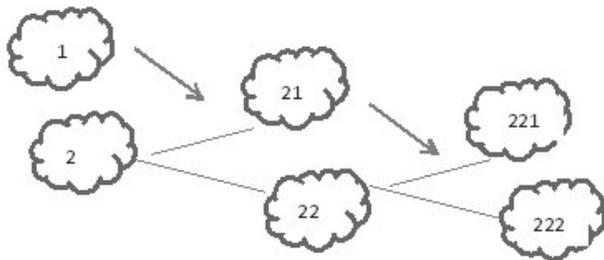


Рисунок 4. Иллюстрация расчета теплового режима системы тел методом поэтапного моделирования

Возможны варианты.

Если тело 21 – некоторая оболочка и температурный датчик установлен на той поверхности, которая находится в теплообмене с телом 22, то граничные условия для 3-го этапа – это температура $t_{гв}(\tau) = t_u(\tau)$.

Если температурный датчик установлен на противоположной поверхности, то необ-

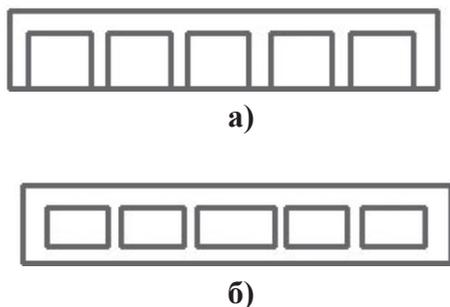


Рисунок 5. Поперечное сечение конструкции облегченных зеркал: а) двухслойное зеркало, б) трехслойное зеркало

ходимо сделать предположение о характере распределения температуры по толщине оболочки, например линейное распределение, и рассчитать температуру на поверхности, находящейся в теплообмене с телами 221 и 222 $t_{гв}(\tau) = t_{21}(\tau) - 2t_u(\tau)$.

Если 21 – некоторое тело (например линза) и его температурное поле можно аппроксимировать параболическим распределением (см. часть III, формула 13) и эта линза, например, находится в лучистом теплообмене с рядом расположенной линзой 22, то $t_{гв}(\tau) = t_{21}(\tau)$.

При выборе функциональных аппроксимаций пространственного распределения температур экспресс оценки (ЭО), рассмотренные в III части статьи, помогают сильно упростить решение задачи, сделать его более понятным и ожидаемым.

Приведем дополнительно ЭО для облегченных зеркал – конструкций наиболее часто применяемых в современной СА.

С точки зрения задачи термостабильности различаются два типа облегченных ячеистых зеркал: двухслойные, состоящие из сплошной пластины, соединенной с облегченной ячеистой структурой, и трехслойные, состоящие из лицевой и задней сплошных пластин и расположенной между ними облегченной ячеистой структуры. (см. рис. 5).

ЭО температурного поля облегченного зеркала целесообразно строить на основе модели из двух узлов, что позволяет оценивать влияние градиента температур по толщине зеркала на сохранность формы рабочей поверхности.

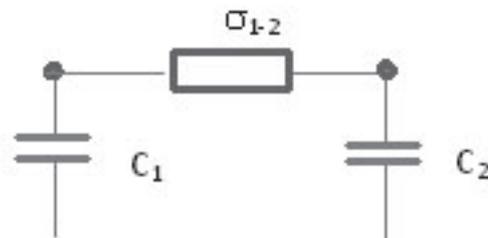


Рисунок 6. Двухузловая тепловая схема ЭО температурного поля облегченного зеркала

Таблица 2.

Параметры ЭО	Двухслойное зеркало		Трехслойное зеркало	
	CO115M, KB	SiC, Be	CO115M, KB	SiC, Be
Теплопроводность, λ , Вт/м К	1,6, 1,3	160, 220	1,6, 1,3	160, 220
Теплоемкость, С Дж/кг К	821., 728	713., 1820	821., 728	713., 1820
Теплоемкость 1-го узла, C_1 , Дж/К	$CM \frac{h_1}{kH}$		$C \frac{M}{2} \left(1 + \frac{h_1 - h_2}{kH}\right)$	
Теплоемкость 1-го узла, C_2 , Дж/К	$CM \left(1 - \frac{h_1}{kH}\right)$		$C \frac{M}{2} \left(1 + \frac{h_2 - h_1}{kH}\right)$	
σ_{1-2} , Вт/К	6 S	$S \frac{\lambda(H - h_1/k)}{(H - h_1)^2}$	6 S	$S \frac{\lambda(H - (h_1 + h_2)/k)}{(H - h_1 - h_2)^2}$

В табл. 2 приведены параметры ЭО облегченных зеркал для четырех наиболее употребительных материалов. Ситалл и плавленый кварц по сравнению с карбидом кремния и бериллием имеют на два порядка меньшую теплопроводность, поэтому в ячеистой структуре зеркал из CO115M и KB основным механизмом теплообмена будет лучистый теплообмен. В ячеистой структуре зеркал из SiC и Be основной механизм теплообмена – кондуктивный.

Здесь k – коэффициент облегчения (отношение облегченного зеркала к массе сплошного зеркала того же объема),

M – масса облегченного зеркала, кг,

S – площадь зеркала, м²,

H – толщина зеркала, м,

h_1 – толщина лицевой пластины, м,

h_2 – толщина задней пластины, м.

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

Задачи восстановления температурного поля по известному НДС актуальны на этапах ЭП и КД. Задаваясь допустимым снижением выходных параметров, разработчик оценивает соответствующие деформации оптических элементов, по которым требуется восстановить их температурные поля и, тем самым, сформулировать требования к температурному режиму СА.

Задача 2.1

Ключевую роль в постановках таких задач играют ЭО на основе модели пластины. Напомним (см. часть III, формула 25), что тем-

пературный прогиб w пластины диаметром d

$$w = \frac{d^2}{8\rho} = \frac{3\alpha d^2}{2h^3(1-\nu)} \int_{-h/2}^{h/2} T(z)z dz \quad (38)$$

Очевидно, что задача определения $T(z)$ по заданному прогибу w некорректна, т.к. имеет бесчисленное множество решений. Для получения решения требуется задать вид функциональной зависимости $T(z)$. Эта априорная информация может быть получена из общей постановки проектной задачи. Можно различать два типа задач:

1) задачи, в которых температурное поле изменяется медленно или близко к стационарному,

2) динамические задачи, в которых тепловые воздействия резко изменяются (открытие крышки, включение какого-либо электронного блока и т.п.).

Для первого типа задач температурное поле принимается линейным. Тогда допустимый градиент температур $\Delta T/h$ по толщине пластины составит

$$\frac{\Delta T}{h} = \frac{8(1-\nu)w}{\alpha d^2} \quad (39)$$

Для ЭО динамических задач распределение температур по толщине пластины можно аппроксимировать параболой n -го порядка [3].

$$T(z) = \Delta T \left(\frac{z}{h}\right)^n \quad (40)$$

Тогда допустимый перепад температур ΔT толщине пластины составит

$$\Delta T = \frac{8(n+2)(1-\nu)hw}{3\alpha d^2} \quad (41)$$

Простейшая ЭО из двух стержней (рис. 7) позволяет оценивать допустимые перепады в сложных ферменных и оболочечных несущих конструкциях и рамах.

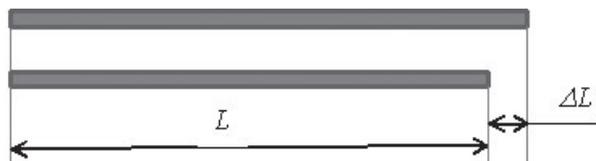


Рисунок 7.
Два стержня

Если одинаковые стержни имеют разную температуру, то относительное изменение длины стержней составит

$$\Delta L = L\alpha(t_1 - t_2) = L\alpha \Delta t \quad (42)$$

где α – коэффициент температурного расширения материала стержней,

t_1 и t_2 – температуры стержней.

Пусть для некоторой оптической конструкции известно, что неравномерное температурное поле в несущей конструкции вызвало разворот оптических деталей (рис. 8) на угол φ .

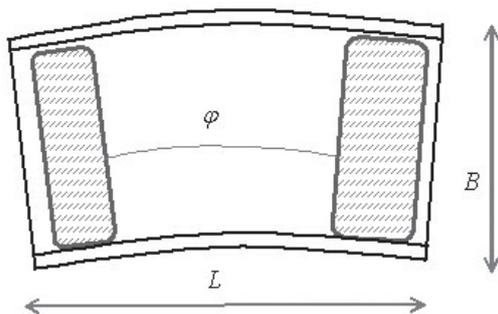


Рисунок 8.
Разворот оптических деталей в несущей конструкции

Полагая, что распределение температур линейно, используя формулу (42), получим оценку допустимого перепада температур по несущей конструкции

$$\Delta t = \frac{\varphi B}{\alpha L} \quad (43)$$

Рассмотрим задачу 2.1 для облегченного зеркала. Пусть известен прогиб w облегченного зеркала переменной толщины $H(r)$. Если дополнительно известно, что прогиб вызван радиальным распределением температур, то решение тривиально

$$\Delta t(r) = \frac{w(r)}{\alpha H(r)} \quad (44)$$

Пусть прогиб обусловлен неравномерным распределением температур по толщине облегченного зеркала. Рассмотрим два облегченных ячеистых зеркала (1 – двухслойное и 2 – трехслойное) из одинакового материала, имеющие равную жесткость. Заданы одинаковые перепады температур по толщине зеркал. Требуется определить, какое из зеркал под действием перепада температур по толщине прогибается больше – это прямая постановка задачи. В обратной постановке задачи заданы одинаковые прогибы зеркал, а требуется определить соответствующие им перепады температур по толщине зеркал и сравнить их.

Для характеристики конструкций облегченных зеркал введем следующие обозначения, которые иллюстрирует рисунок 9.

H_1 – толщина двухслойного зеркала,

H_2 – толщина трехслойного зеркала,

h_1 – толщина сплошной пластины двухслойного зеркала,

h_{21} – толщина лицевой сплошной пластины трехслойного зеркала,

h_{22} – толщина задней сплошной пластины трехслойного зеркала,

B – размер ячейки,

δ – толщина ребра,

E – модуль упругости материала зеркал,

α – коэффициент температурного расширения материала зеркал.

Полагая, что форма и размеры ячеек, толщины ребер облегченной структуры, толщины сплошных пластин в обеих конструкциях зеркал одинаковы ($h_1 = h_{21} = h_{22} = h$), опреде-

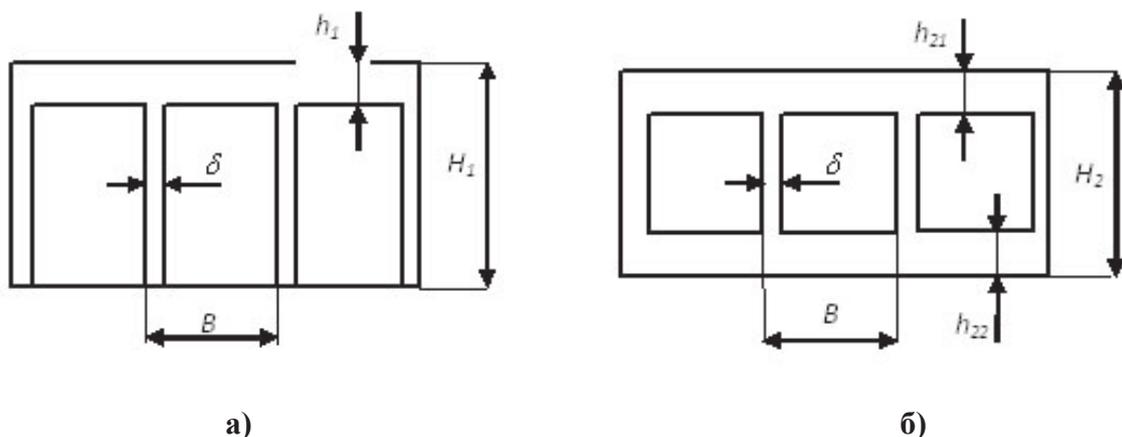


Рисунок 9.

Обозначения геометрических параметров конструкций облегченных зеркал:
 а) двухслойное зеркало, б) трехслойное зеркало

лим, какова должна быть толщина двухслойного зеркала, чтобы его жесткость была равна жесткости трехслойного зеркала.

Жесткость G зеркала примем как изгибную жесткость балки, имеющей сечение элементарной ячейки.

$$M = EJ \cdot w = G \cdot w \quad (45)$$

здесь: M – момент,
 E – модуль упругости,
 J – момент инерции сечения,
 w – прогиб.

Момент инерции для двухслойного зеркала вычисляется по формуле для тавра

$$J_1 = \frac{h^3}{12} B + hB \cdot \left(\frac{h}{2} + x \right)^2 + \frac{(H_1 - h)^3}{12} \delta + \left(\frac{H_1 - h}{2} - x \right)^2 (H_1 - h) \delta \quad (46)$$

$$x = \frac{1}{2} \frac{(H_1 - h)^2 \delta - h^2 \delta}{hB + (H_1 - h) \delta}$$

Момент инерции для трехслойного зеркала

$$J_2 = \frac{H_2^3}{12} B - \frac{(H_2 - 2h)^3}{12} (B - \delta) \quad (47)$$

На рис. 10 представлены графики зависимости момента инерции J зеркал от толщины сплошной пластины h для различных значений H_1 и H_2 , например для $B=0,06$ м, $\delta=0,006$ м.

С помощью таких графиков получаем простую ЭО связи толщин зеркал. Пусть трехслойное зеркало имеет $h=0,02$ м, $H_2=0,2$ м, тогда определяем из рисунка 10, что двухслойное зеркало равной жесткости при про-

чих равных условиях, должно иметь $H_1=0,283$ м.

Сравним температурную расстраиваемость двухслойного и трехслойного зеркал одинаковой жесткости. В качестве критерия температурной расстраиваемости примем прогиб зеркала под действием перепада температур 1K по его толщине. Чем больше прогиб, тем больше расстраиваемо зеркало.

Последовательно находим перепады температур, градиенты и прогибы на сплошных пластинах и облегченной структуре. Далее на облегченной структуре вводим дополнительный момент, который уравнивает прогибы сплошной и облегченной структур, и

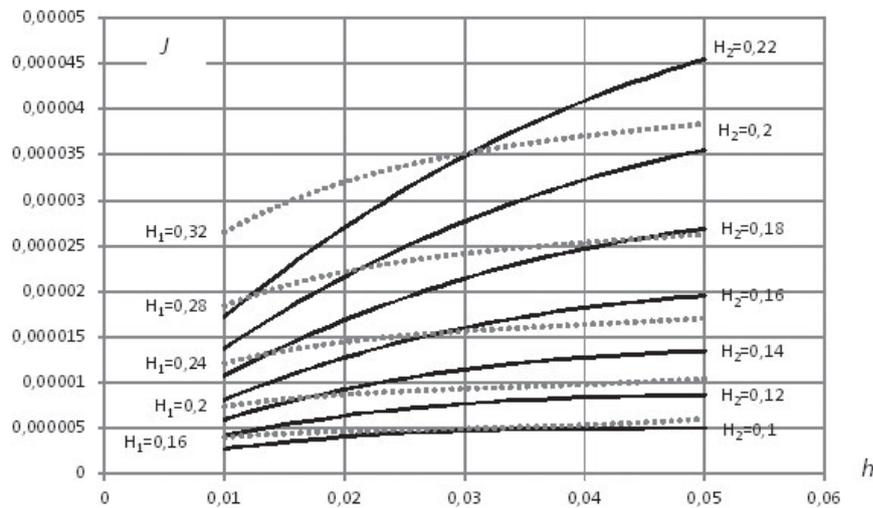


Рисунок 10.
Зависимости момента инерции сечения от толщины сплошной пластины и толщин зеркал

находим прогиб зеркала под действием этого дополнительного момента. В заключении определяем прогиб зеркал как алгебраическую сумму прогиба сплошной пластины и дополнительного прогиба. Все формулы для этих расчетов представлены в таблице 3.

УТОЧНЕНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ МАТЕРИАЛОВ

Эта группа задач актуальна для СА, предназначенной для эксплуатации в широком диапазоне температур, вплоть до криогенных, при которых существенно изменяются термомеханические коэффициенты материалов.

Задача 2.2

Неравномерное распределение коэффициента температурного расширения (КТР) по объему оптической детали (зеркала), зависимость КТР элементов конструкции от температуры приводят к термическим деформациям зеркал и элементов конструкции даже при равномерном температурном поле.

Пусть задан диапазон рабочих температур ΔT и допустимый температурный изгиб зеркала $w_{дон}$. Определим требования к неоднородности КТР по объёму зеркала. Воспользуемся формулами для тонкой пластины, в

которых температуру примем постоянной, а КТР переменной величиной, зависящей от пространственной координаты. Будем различать неоднородности КТР по $\Delta\alpha_r$ диаметру и по толщине $\Delta\alpha_h$ зеркала. Тогда прогиб зеркала от радиальной неоднородности

$$w = h/2 \cdot \Delta\alpha_r \cdot \Delta T \quad (49)$$

Прогиб зеркал от неоднородности по толщине

$$w = d^2 / 8 \cdot \Delta\alpha_T / h \cdot \Delta T \quad (50)$$

Из формул (49,50) находим требования к неоднородности КТР

$$\Delta\alpha_r = \frac{2w_{дон}}{\Delta T \cdot h} \quad (51)$$

$$\Delta\alpha_T = \frac{w_{дон} \cdot h \cdot 8}{\Delta T \cdot d^2} \quad (52)$$

Положим $\Delta T = 200\text{K}$, $w_{дон} = 0,1$ мкм (что характерно для ИК криогенной оптики). Сравним требования для зеркал, диаметром $d = 1$ м, толщиной $0,1$ м из карбида кремния и алюминия. Результат приведен в таблице 4. Требования к неоднородности КТР алюминиевого зеркала почти на порядок жестче требований к зеркалу из карбида кремния.

Таблица 3.

Параметр	Двухслойное зеркало	Трехслойное зеркало
Перепад температур на сплошных пластинах, Δt_{cn}	$\frac{6}{\lambda/h + 6}$	$\frac{6}{\lambda/h + 12}$
Градиент температур на сплошных пластинах, Γ_{cn}	$\frac{6/h}{\lambda/h + 6}$	$\frac{6/h}{\lambda/h + 12}$
Свободный прогиб сплошной пластины, $1/\rho_{cn}$	$\alpha\Gamma_{cn}$	$\alpha\Gamma_{cn}$
Перепад температур на облегченной структуре, Δt_{obl}	$\frac{\lambda/h}{\lambda/h + 6}$	$\frac{\lambda/h}{\lambda/h + 12}$
Градиент температур на облегченной структуре, Γ_{obl}	$\frac{\lambda/h}{(\lambda/h + 6) \cdot (H - h)}$	$\frac{\lambda/h}{(\lambda/h + 12) \cdot (H - 2h)}$
Свободный прогиб облегченной структуры, $1/\rho_{obl}$	$\alpha\Gamma_{obl}$	$\alpha\Gamma_{obl}$
Дополнительный момент на облегченной структуре, M_{don}	$(1/\rho_{obl} - 1/\rho_{cn}) \cdot EJ_{2obl}$	$(1/\rho_{obl} - 1/\rho_{cn}) \cdot EJ_{3obl}$
Дополнительный прогиб зеркала, $1/\rho_{don}$, $J_2=J_3$, S-площадь тавра	$\frac{M_{don}}{EJ_2 + S((H_2 - h)/2 - x)^2}$	$\frac{M_{don}}{EJ_3}$
Прогиб зеркала под действием перепада 1 К	$1/\rho_{cn} + 1/\rho_{don}$	$1/\rho_{cn} + 1/\rho_{don}$

Таблица 4.

Параметр	Карбид кремния	Алюминий
КТР, α	$3 \cdot 10^{-6}$	$22 \cdot 10^{-6}$
$\Delta\alpha_r$	Можно пренебречь	
$\Delta\alpha_T$	$0,4 \cdot 10^{-6}$	
$\Delta\alpha_T/\alpha$ 100%	13,3%	1,8%

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Малые взаимные перемещения оптических деталей приводят к смещениям поля зрения СА и шкалы длин волн (для гиперспектральной аппаратуры) или к снижению качества изображения СА.

Задача 3.1

Смещение поля зрения СА описывается двумя параметрами, поэтому для корректного решения задач этой группы необходимо выбрать конкретный элемент оптической системы, который подвержен температурным перемещениям. В технической оптике такого рода математическая постановка задачи, связывающая свойства прибора (функции)

с независимыми малыми интервалами изменения параметров этого прибора, называется **юстировка** [13, стр. 4], созданы аналитические методы для безграничного многообразия возникающих на практике вопросов и задач юстировки [14]. Этот огромный научно-технический задел позволяет легко строить актуальные термооптические ЭО.

Рассмотрим оптическую систему, состоящую из объектива и плоского зеркала, расположенного между объективом и его фокальной плоскостью так, что нормаль зеркала образует угол ε с оптической осью объектива (рис. 11).

Пусть известно, что в результате температурного разворота зеркала произошло сме-

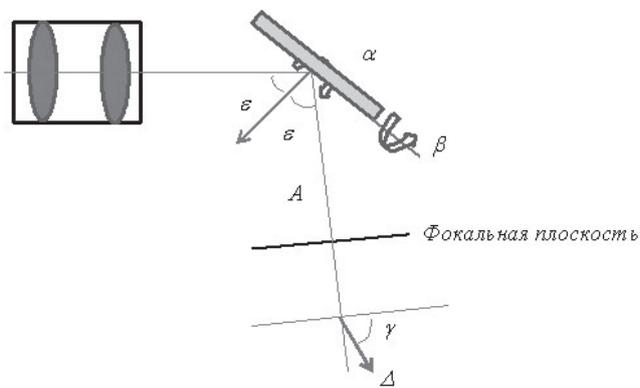


Рисунок 11.

Температурный разворот компонентного зеркала в оптической системе

щение поля зрения объектива, т.е. известна величина смещения Δ и его направление γ . Требуется найти угол разворота зеркала φ и его направление δ . Используем известное решение юстировочной задачи о влиянии малого поворота плоского зеркала на направление отраженного луча и наклон изображения [14]. Отраженный луч при повороте плоского зеркала на малый угол β вокруг оси, совпадающей с плоскостью падения луча и отражающей плоскостью зеркала, отклоняется в боковом направлении в сторону поворота зеркала на угол $2\beta \cos \varepsilon$ и вверх (к поверхности зеркала) на весьма малый угол $2\beta^2 \sin 2\varepsilon$. Кроме того, возникает расфокусировка осевого пучка - $2A\beta^2 \cos \varepsilon$. Здесь A – расстояние между точкой падения луча на зеркало и фокальной плоскостью. Если зеркало разворачивается на малый угол α относительно точки падения луча на зеркало так, что его нормаль остается в плоскости падения луча, то отраженный луч разворачивается на 2α и возникает расфокусировка осевого пучка - $2A\alpha^2$. Находим малые α и β

$$\alpha = \frac{\Delta \cos \gamma}{2A}, \quad \beta = \frac{\Delta \sin \gamma}{2A \cos \varepsilon} \quad (53)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Задача количественного определения температурных изменений параметров оптической детали, вызывающих заданное снижение качества изображения СА, в ее общей

постановке есть одна из главных задач оптического приборостроения – определение связи допусков на оптические детали с качеством изображения оптического прибора. Практическое рассмотрение этих вопросов изложено в [13-16].

Задача 3.2

В качестве критерия качества изображения СА обычно задают коэффициент передачи контраста на частоте Найквиста. Для решения задачи принимаются следующие допущения:

1. Деформации волнового фронта малы, т.е. не превышают $\lambda/30$. Это допущение позволяет использовать ЭО на основе формул Стила (см. часть III)
2. Деформация оптической детали описывается аналитически относительно простой формулой, (т.е. применяется метод функциональной аппроксимации) близкой к коэффициентам волновых аберраций.

Эти допущения и опыт аналитических решений широкого круга прямых задач [13-16] позволяет находить решение обратных задач. В случаях, когда аналитическое описание деформаций слишком сложно, обратная задача решается численно методом подбора прямых решений.

РЕСТАВРАЦИЯ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СА

На этапе эксплуатации основное время работы СА должно тратиться на съемку. Однако, из-за изменения внешних тепловых условий, деградации материалов, покрытий и электроники требуется периодический контроль выходных характеристик СА. Возникает задача подтверждения сохранности выходных характеристик СА (фотограмметрических, пространственно-частотных, спектрорадиометрических), т.е. реставрации выходных характеристик в процессе съемки.

Задача 3.3

Пусть по результатам контроля известны выходные характеристики СА. Требуется обосновать, что выходные характеристики СА не меняются вплоть до последующего их контроля. В такой постановке задача явно

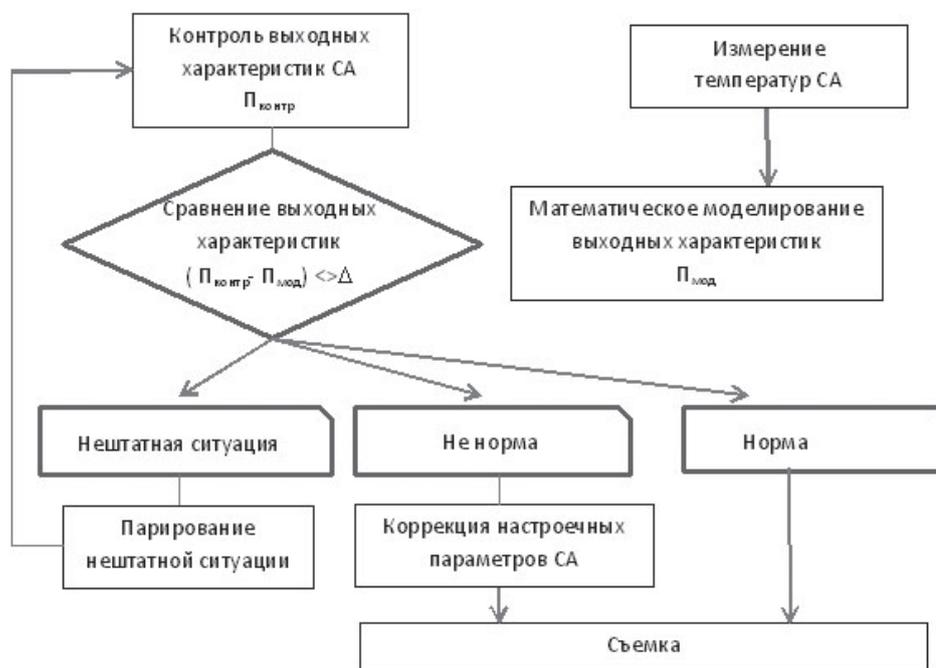


Рисунок 12.
Схема решения задачи 3.3

некорректна. Переформулируем: требуется обеспечить сохранность выходных характеристик СА. В новой постановке задача расширяется до одной из главных задач ОКР по созданию СА и должна решаться на этапах ЭП и КД. В новой постановке с математической, узкой точки зрения, задача остается обратной, но в более широком смысле это уже проектная, творческая задача. Решение начинается с разработки структурно-функциональной схемы СА, включения в состав СА средств непрерывного (даже во время съемки) контроля параметров СА, адекватного математического моделирования поведения СА в условиях эксплуатации.

Укрупненная схема решения задачи представлена на рис. 12.

Для реализации этой схемы должны быть выполнены следующие работы:

- разработка модели термостабильности, которая описывает влияние теплового режима СА на ее выходные характеристики (фотограмметрические, радиометрические, пространственно-частотные) СА;
- разработка схемы контроля теплового режима (измерение температур) СА;
- разработка алгоритмов и наземного про-

граммного обеспечения получения, обработки, анализа, хранения температурной информации;

- разработка критериев нормы, отклонения от нормы, нештатного теплового режима;
- разработка алгоритмов и наземного программного обеспечения коррекции настроечных параметров СА, в том числе:

массивов фотограмметрических параметров как функций температуры, массивов радиометрических параметров, как функций температуры, фокусировка как функция температуры.

- разработка алгоритмов и бортового программного обеспечения парирования нештатных ситуаций теплового режима (в том числе включение системы термостабилизации, включение систем юстировки, перепрошивка бортового программного обеспечения и пр.);

- разработка регламентов контроля теплового режима контроля СА, регламентов и процедур коррекции настроечных параметров СА.

Список литературы:

1. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. – М.: Машиностроение, 1988.

2. Тихонов Н.А., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979.
3. Дульнев Г.Н., Тихонов С.В. Основы теории теплообмена. – СПб: СПб ГУИТМО, 2010.
4. Бек Дж. и др. Некорректные обратные задачи теплопроводности. – М.: Мир, 1989.
5. Брайсон А., Хо Ю-ши. Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972.
6. Верлань А.Ф. Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. . – Киев: Наук. Думка, 1986.
7. Платунов Е.С. и др. Теплофизические измерения и приборы. –Л.: Машиностроение, 1986.
8. Исimoto, Пан. Методы коррекции тепловых моделей./ Теплообмен и тепловой режим космических аппаратов. . – М.: Мир, 1974.
9. Краснов М.Л. и др. Сборник задач по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Высшая школа, 1978.
10. Тайбин Б.З. Методы обнаружения параметров многоэкспоненциальных кривых релаксации. СПб. 1994.
11. Хемминг Р.В. Численные методы для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1972.
12. Воеводин В.В. Вычислительные основы линейной алгебры М.: Наука, 1977.
13. Русинов М.М. Юстировка оптических приборов. М.: Недра, 1969.
14. Погарев Г.В., Киселев Н.Г. Оптические юстировочные задачи. Л.: Машиностроение, 1989.
15. Мальцев М.Д. Расчет допусков на оптические детали. М.: Машиностроение, 1974.
16. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1989.

СИНТЕЗ И ОБРАБОТКА ФОТОРЕАЛИСТИЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

СЕДОВ М. Е.

Научно-исследовательский центр РКО 4 ЦНИИ МО РФ, г. Москва

E-mail: mlsedov@ya.ru

В рамках проекта по разработке комплекса математических моделей для имитации функционирования космического аппарата, решающего информационные задачи системы контроля космического пространства в области геостационарной орбиты возникла задача синтеза (моделирования) фотореалистичных изображений космических объектов при наблюдении с различных ракурсов при разных условиях освещения. По полученным последовательностям изображений строились фотометрические кривые. В статье рассматриваются применённые при научно-исследовательских изысканиях подходы, методы, программные продукты. Полученные результаты позволяют говорить о применимости рассмотренных методов моделирования в различных задачах.

Ключевые слова: освещённость, моделирование, программа Blender, фотометрия, звёздная величина.

Получение фотореалистичных изображений достигается за счёт применения алгоритмов трассировки лучей, учёта первичного и вторичного освещения, использования физически корректных моделей отражения света от материалов. Вся работа с трёхмерной графикой выполнялась в Blender – свободном, профессиональном пакете для создания трёхмерной компьютерной графики. В отличие от разработки 3D-моделей только с помощью языков программирования, применение этого программного продукта значительно ускоряет получение первых практических результатов. Blender включает в себя все необходимые инструменты для создания 3D-моделей, настройки свойств поверхностей, условий освещения. Этот программный продукт позволяет использовать язык программирования Python для любых манипуляций с графикой и создания полноценных приложений на базе Blender. Полная поддержка языка Python открывает большие возможности по использованию огромного количества готовых модулей и компонентов для математических вычислений, построе-

нию графиков, анализу изображений. В данном случае Python применялся для расчёта орбит космических объектов, а также для создания интерактивной трёхмерной модели пространства около спутника-наблюдателя. В результате были получены фотореалистичные изображения и анимации пролёта космических объектов мимо спутника-наблюдателя.

Для построения фотометрических кривых синтезировались последовательности изображений (кадры) пролетающего объекта. Полученные кадры обрабатывались с помощью MATLAB. Для каждого кадра определялась яркость каждого компонента, по совокупности значений которых строилась фотометрическая кривая. Так как мы работаем с виртуальными величинами, то на первоначальном этапе была проведена калибровка коэффициента, для приведения к одному уровню реальной и виртуальной яркости.

Форма расчётной кривой и кривой по результатам моделирования очень близки, введение поправочного коэффициента позволяет получать реальные значения яркости для объектов.

Выведенная формула для расчёта звёздной величины сферы:

$$m = 2.5 \cdot \left(\lg \left(\frac{1}{\cos^2 \left(\frac{p}{2} \right)} \right) - \lg \left(\frac{1}{4} \cdot \alpha \cdot \left(\frac{r}{l} \right)^2 \cdot E_0 \right) \right) + K$$

где p – фазовый угол, α – альбеде, r – радиус сферы, l – расстояние до сферы, E_0 – интенсивность солнечного излучения, падающего на сферу, K – коэффициент, равный значению 15.4.

Правильность формулы подтверждается сравнением расчётных, эмпирических и смоделированных фотометрических кривых планет солнечной системы.

На рис.1 показана фотометрическая кривая луны при разных фазовых углах. Яркость выражена в звёздных величинах, отложенных по оси Y, по оси X отложен фазовый угол. Соответственно, чем значение по оси Y меньше, тем ярче объект.

В процессе НИР было проведено моделирование пролёта спутника над наземной станцией наблюдения, моделирование пролёта спутника и спутника наблюдателя на низкой

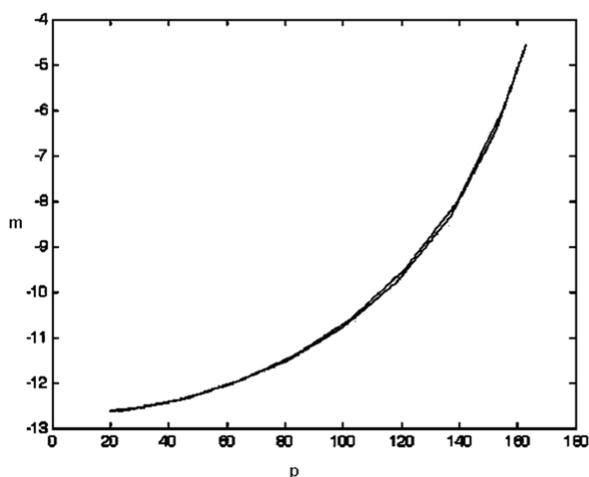


Рисунок 1.
Фотометрические кривые расчётной и смоделированной Луны

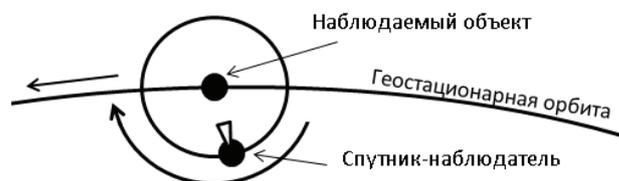


Рисунок 2.
Фотометрические кривые расчётной и смоделированной Луны

околосредней орбите, моделирование наблюдения спутника и спутника-наблюдателя на геостационарной орбите. Во всех случаях проводилось построение фотометрических кривых, снимались данные по фазовым углам и другой координатной информации.

Наиболее интересным и показательным является результат моделирования наблюдения за объектом на геостационарной орбите. Моделировалось наблюдение за спутником Intelsat 22, спутник-наблюдатель описывал круговое движение вокруг наблюдаемого объекта за счёт небольшого эксцентриситета орбиты (рис. 2).

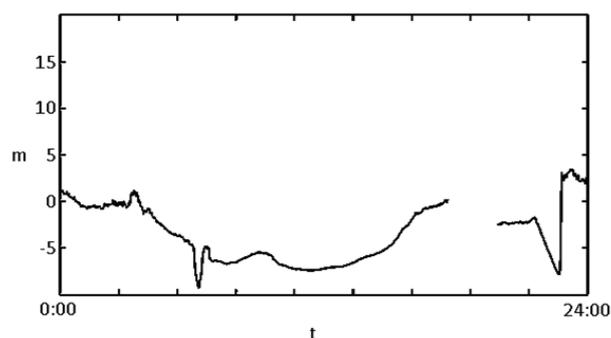


Рисунок 3.
Фотометрическая кривая спутника Intelsat 22

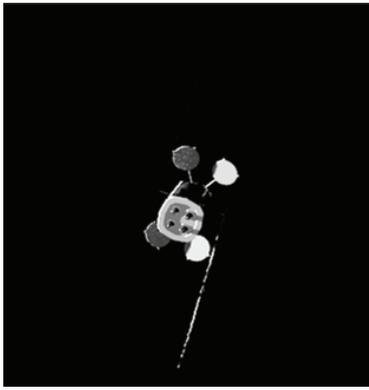


Рисунок 4.
Визуализация спутника Intelsat 22

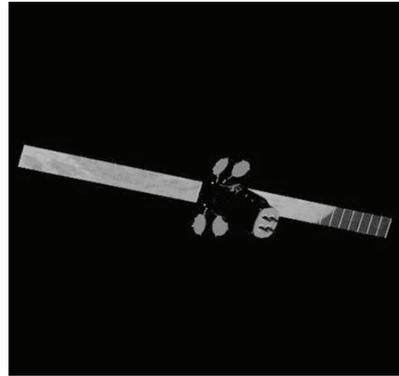


Рисунок 5.
Визуализация спутника Intelsat 22

На рис. 3 изображена фотометрическая кривая, выраженная в звёздных величинах. На графике отображён полный оборот спутника-наблюдателя вокруг наблюдаемого объекта за сутки. На фотометрической кривой видны области всплеска яркости (отблеск солнечных батарей, попадание края Земли в кадр) и проход через область тени (обрыв кривой).

Другое прикладное применение – оценка требований к оптической системе в первом приближении. В инструментарий программы Blender входит виртуальная камера с воз-

можностью настройки размера матрицы, фокусного расстояния и других параметров.

Список литературы:

1. Курт Арнольд, Методы спутниковой геодезии, М.: Недра, 1973. – 221 с.
2. Эльясберг П.Е., Введение в теорию полёта искусственных спутников земли, М.: Книжный дом «Либроком», 2011. – 544 с.
3. Наблюдение искусственных спутников Земли. <http://sat.belastro.net>, 2011.
4. Blender API documentation, <https://blender.org/api>, 2015.

РАЗРАБОТКА НИЗКОУРОВНЕВЫХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ КАМЕР, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ОБЪЕКТАХ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

ДРОБОТ А.С., АБРАМЕШИН В.В., ДАВИДЕНКО В.П., ГОПОНЕНКО Е.В.

АО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: ogk45@lzos.ru

В статье рассматривается разработка низкоуровневых телевизионных камер с ч/б изображением для объектов специального назначения, их использование в обзорных комплексах, компоновка изготавливаемых и разрабатываемых телевизионных камер, систем наблюдения на их основе и перспективные направления развития телевизионных приборов наблюдения.

Ключевые слова: ПЗС матрица, низкоуровневая телевизионная камера.

Начиная с 2003 года предприятием АО ЛЗОС ведется разработка и изготовление низкоуровневых ч/б телевизионных камер, используемых на объектах специальной техники. Телевизионные камеры типа ТВКТ (рис. 1) разрабатывались на основе модуля с ч/б ПЗС матрицей 1/3" Sony ICN259AL.

Позднее (2009 г.) матрица была заменена на ч/б матрицу 1/3 " Sony ICX659ALA, с целью повышения чувствительности телекамер. Линейка телекамер типа ТВКТ вы-

полнена в одних габаритно-присоединительных размерах и включает в себя камеры с углами обзора в горизонтальной плоскости 33°, 43°, 65°, 80°, 95°. Диапазон рабочих освещенностей составляет от 0,01 до 30000 лк.

Телекамеры типа ТВКТ обеспечивают возможность применения как в виде одиночного прибора наблюдения так и применение в системах видеонаблюдения, одна из таких систем представлена на рис. 2.



Рисунок 1.
Телевизионная камера типа ТВКТ

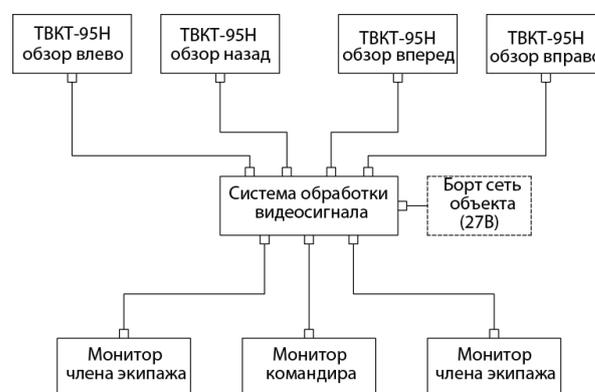


Рисунок 2.
Система видеонаблюдения

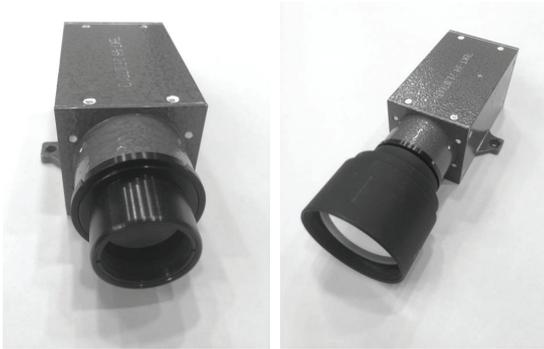


Рисунок 3.
Телевизионные камеры ТВКТ-3Н и ТВКТ-9Н

Позднее перед АО ЛЗОС была поставлена задача разработки низкоуровневых ч/б телевизионных камер для использования в составе оптико-электронных систем наблюдения на стационарных и подвижных комплексах.

За основу были взяты уже опробованные модули на основе ч/б ПЗС матриц 1,3" Sony ICX659ALA, доработанные в части введения возможности внешней синхронизации кадровым синхроимпульсом.

Линейка состоит из камер (рис. 3) с углами обзора в горизонтальной плоскости 3°, 9°, 20°.

Оба типа телевизионных камер прошли все необходимые испытания, как автономные, так и в составе объектов применения, в результате были подтверждены технические и качественные характеристики.

В 2011 году перед специалистами АО ЛЗОС была поставлена задача разработки камеры с ч/б изображением, углом обзора



Рисунок 4.
Обзорная камера

68±2°, работающей в широком диапазоне освещенностей от 0,01 до 100 000 лк.

Камера разрабатывалась на базе модулей с ч/б ПЗС матрицей 1/2" Sony ICX429ALL. Результатом разработки стала обзорная камера (рис. 4). Технические характеристики изделия были подтверждены результатами автономных испытаний. В данный момент проводятся испытания в составе объектов применения.

В настоящее время АО ЛЗОС продолжает работы в области разработки телевизионных приборов наблюдения, работающих в широком диапазоне освещенностей, для объектов спецтехники на основе современных приемников излучения

В статье представлен более чем десятилетний опыт разработки низкоуровневых ч/б телевизионных камер, а также перспективные направления развития телевизионных приборов наблюдения.

ВЫСОКОТОЧНОЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛИНЕЙНО-УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ И ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

ЛУЧКО С.С., ЧЕРЕПОВ В.Е.

ЗАО «НПФ «Уран», г. Санкт-Петербург

E-mail: jcherepov@uran-spb.ru

В статье представлен обзор современных оптико-электронных приборов производства Trioptics (Германия) и Mahr (Германия) для измерения геометрии оптических деталей, контроля оптических параметров, а также оборудование для сборки оптики.

Ключевые слова: измерительные приборы.

Компания «Научно-производственная фирма «Уран» основана в 1996 году в Санкт-Петербурге и специализируется на поставках, ремонте и сервисном обслуживании высокоточных измерительных систем. Партнерами компании являются крупнейшие иностранные производители измерительного оборудования - компании Werth, Mahr, Trioptics, Mitutoyo. «Уран» имеет штат высококвалифицированных инженеров по применению и сервисных инженеров, осуществляющих запуск оборудования в эксплуатацию на территории предприятия-заказчика, обучение персонала работе с приборами, сервисное обслуживание оборудования. За 20-летнюю историю своей деятельности внедрила в производство более 130 сложных измерительных систем для контроля линейно-угловых размеров и оптических параметров.

Одним из ключевых партнеров ЗАО «НПФ «Уран» является компания Trioptics – ведущий производителем оптико-электронного измерительного оборудования с мировым именем. Компания была основана в 1991 году в г. Ведель (Германия).

На сегодняшний день компания имеет штат из 170 сотрудников, включая специалистов с ученой степенью, дипломированных инженеров, проектировщиков и программистов. Высокое качество выпу-

скаемой продукции обусловлено современной производственной базой производства, обеспечивающей создание 3Д прототипов, механическую обработку деталей и сборку оптики.

Выпускаемые компанией Trioptics приборы можно разделить на три группы: приборы для контроля геометрии деталей, используемых на оптическом производстве (пробные стекла, призмы), приборы для контроля оптических параметров материалов, деталей и узлов (показатель преломления, погрешность центрирования, коэффициент передачи модуляции), а также оборудование для сборки оптики (склейки линз и сборки объективов).

Среди приборов первой группы следует выделить автоколлиматоры серии UltraSpec, предназначенные для измерения угловых отклонений с погрешностью $\pm 0,05$ секунды, гониометры серии PrismMaster с погрешностью измерения углов $\pm 0,2$ секунды, оснащенные автоколлиматорами с большим полем зрения (4000 x 3200 с и 3000 x 2200 с в зависимости от модели), а также приборы серии OptiSurf, принцип работы которых основан на низкокогерентной интерферометрии, измеряющие толщину оптических деталей (стеклянные пластины, линзы в объективе и др.) бесконтактным способом с

погрешностью до $\pm 0,15$ мкм. Отдельно отметим, что большинство приборов из этой группы включены в гос. реестр СИ.

К оборудованию второй группы относятся приборы серии OptiCentric для контроля погрешности центрирования всех типов линз, гониометры-спектрометры серии SpectroMaster, вычисляющие показатель преломления материалов в спектральном диапазоне от УФ до дальнего ИК с погрешностью 2×10^{-6} (в видимом диапазоне), а также приборы серии ImageMaster, предназначенные для комплексной оценки качества передачи изображения оптическими системами путем построения графиков зависимости контраста изображения от пространственной частоты.

Последняя группа приборов включает оборудование серии Cementing station для клейки линз с предварительным совмещением их оптических осей, станции для клейки линз в оправы серии Bonding station, а также станции для центрировки завальцованных линз путем подрезки оправ.

Отдельно хотелось бы отметить несколько новых разработок, представленных в 2015 году. Одной из таких новинок стала станция MultiCentric, предназначенная для клейки линз в условиях крупносерийного производства, оснащена блоком из трех автоколлиматоров, позволяющим одновременно измерять погрешность центрирования каждой из трех поверхностей склеиваемых линз. Благодаря этому две линзы диаметром до 200 мм могут быть выровнены относительно друг друга за несколько секунд с остаточной децентрировкой не более 2 секунд.

Вторым прибором, запущенным в производство, стала станция серии OptiCentric Bonding 5D, позволяющая осуществлять выравнивание (с последующей клейкой) линзы в оправе в пяти плоскостях, в том числе по оси Z.

Основой станции стал многорычажный

манипулятор, управляющий положением линзы, благодаря которому погрешностью выравнивания составила не более 1 мкм.

Еще одним партнером ЗАО НПФ «Уран», предлагающим решения для оптической промышленности, является компания Mahr (Германия), основанная в 1861 году и специализирующаяся на разработке и производстве высокоточного оборудования для контроля линейно-угловых размеров. Одним из наиболее перспективных приборов, представленных в докладе, является станция MFU200, позволяющая бесконтактным методом контролировать отклонение от формы линз с погрешностью не более 100 нм (параметр PV). Прибор имеет специальные программные решения для контроля геометрии цилиндрических линз, асферических линз, элементов с дифракционной структурой, а также поверхностей нестандартной формы, описываемых при помощи уравнений. Важной особенностью приборов данной серии является совместимость их программного обеспечения с программной оболочкой обрабатывающих станков, что позволяет передавать данные в станок и корректировать геометрию обрабатываемых деталей исходя из результатов их измерений.

Таким образом, компании Trioptics и Mahr предлагают как традиционные для оптической промышленности приборы (автоколлиматоры, сферометры, гониометры), так и уникальное оборудование, не имеющее аналогов на российском рынке измерительных систем.

Это делает возможным решение ваших измерительных и технологических задач на современном уровне, что ускоряет цикл производства изделий и повышает качество выпускаемой продукции. При этом ЗАО НПФ «Уран» стремится обеспечить индивидуальный подход к поставленным задачам и адаптировать их решение к особенностям вашего производства.

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПРИБОРОВ ДЛЯ БТТ

ТРЯСОВ Ю.А., ЮЖИК И.Б.

АО «Швабе – Оборона и Защита», г. Новосибирск

E-mail: npzkanc@ponpz.ru

Цифровые технологии явились важным шагом в развитии и построении нового класса приборов ночного видения 4-го поколения. При формировании приборного оснащения перспективных видов танковой техники предприятия АО «Швабе - Оборона и Защита» и АО «Швабе-Приборы» разработали дневно-ночной прибор ТВК-1Б.

Ключевые слова: оптоэлектронные приборы, цифровой импульсный ЭОП, динамический диапазон, импульсный режим работы.

ВВЕДЕНИЕ

Видение в темное время суток в основном обеспечивается приборами ночного видения (ПНВ) на электронно-оптических преобразователях (ЭОП). Приборы ночного видения просты конструктивно и в эксплуатации, имеют высокое разрешение и относительно низкую стоимость. Но их дальность действия сильно зависит от характеристик внешних условий: от уровня естественной ночной освещенности; прозрачности атмосферы; контраста цель-фон. Приборы ночного видения 1-го и 2-го поколений имеют низкую помехозащищенность. Приборы ночного видения третьего поколения имеют хорошее разрешение и чувствительность, но у них малый динамический диапазон [1].

Если необходимо организовать работу в закрытых помещениях, таких как туннели, линии метро, подвалы или в условиях закрытого горизонта, например: лес; лесные просеки; горные ущелья; улицы и города без освещения; приборы ночного видения работают, лишь при использовании специально организованной подсветки.

Появившиеся цифровые технологии явились важным шагом в развитии приборостроения, а так же в развитии и построении нового класса приборов ночного видения

4-го поколения. В приборах ночного видения 4-го поколения широко используется как аналоговая, так и цифровая электроника. В цифровых приборах ночного видения применяют дополнительную цифровую электронику в интегральном исполнении, которая обеспечивает импульсный режим работы ЭОП. Импульсный режим работы ЭОП значительно расширяет функциональные возможности прибора ночного видения. В цифровых приборах ночного видения происходит автоматически анализ внешней освещенности, изменение режимов работы ЭОП, индикация или отображение информации о сложившейся ситуации и режимах работы прибора, а так же изменение параметрических напряжений в зависимости от температуры окружающей среды.

Введение дополнительных функций в ПНВ позволило расширить динамический диапазон ПНВ в зависимости от внешней освещенности, при которой прибор работает без потерь технических характеристик. Прибор становится устойчивым и не выходит из строя при освещенностях вплоть 100 тысяч люкс. Прибор приобретает способность работать в комплексе с мощными лазерными осветителями, что позволяет обнаруживать оптико-электронные средства (ОС) противника на значительных расстояниях.

ДНЕВНО-НОЧНЫЕ ПРИБОРЫ

Развитие ПНВ было вызвано необходимостью оснащения Вооруженных Сил России техникой, обеспечивающей ведение боевых действий днем и ночью. Предприятия г. Новосибирска создали научно-технические основы разработки подобного класса приборов ночного видения, обеспечили их серийное производство и принимали непосредственное участие в испытаниях приборов на полигонах МО РФ.

Широкий динамический диапазон рабочих освещенностей в ПНВ нового поколения достигается за счёт возможности работы приборов в пассивном и импульсном режимах. В пассивно-импульсном режиме высокий уровень освещенности на местности ослабляется в число крат, равное скважности работы ЭОП прибора. Переход от чисто пассивного режима к пассивно-импульсному режиму позволяет реализовать практически круглосуточное наблюдение [2].

Целесообразность разработки дневно-ночных приборов обусловлена необходимостью круглосуточной работы (наблюдения, разведки, прицеливания и вождения бронетанковой техники).

По своему функциональному назначению дневно-ночные приборы подразделяются на три вида:

- наблюдательные приборы;
- прицелы;
- комплексы.

При формировании приборного оснащения перспективных БТТ предприятиями АО «Швабе - Оборона и Защита» и АО «Швабе-Приборы» было предложено в инициативном порядке разработать дневно-ночной прибор ТВК-1Б механика водителя. В результате творческого поиска и проведенных расчетов разработан смотровой прибор с уникальной электронно-оптической схемой переключения каналов (день – ночь) [3].

Уникальные эксплуатационные свойства прибора ТВК-1Б обеспечивают его высокую конкурентоспособность. Прибор разработан на современной элементной базе с применением цифрового импульсного ЭОП. Нако-

пленный научно - практический опыт в области техники ночного видения реализован в электронной части прибора [4], [5].

Прибор может быть установлен на различные объекты бронетехники, имеющие шахту, аналогичную БМП-3, а также на танках Т-80, Т-72 и других объектах БТТ на их базе. На основе конструкторских решений, проверенных на приборе ТВК-1Б, доказана возможность разработки унифицированного ряда приборов типа ТВК-1 для объектов БТТ, объединенных в группы на базе БМП-1, БМП-2, БМП-3, Т-55, Т-80, Т-72 (Т-90) и др.

Прибор ТВК-1Б обеспечивает круглосуточное наблюдение при вождении БТТ во всем диапазоне естественной освещенности, меняющейся в течение суток, а также в условиях быстроменяющейся освещенности, возникающей в сумерки или ночью при движении БТТ по пересеченной местности, когда в поле зрения попадают: то светлое небо, то темная трасса. Постоянная видимость в приборе ТВК-1Б трассы в направлении движения БТТ автоматически сохраняется также при появлении в поле зрения световых помех, а оперативное переключение каналов (день-ночь) предоставляют механику-водителю возможность выбора оптимальных условий наблюдения.

Применение унифицированного круглосуточного прибора ТВК-1Б значительно повышает эффективность применения и реального использования возможностей (БТТ) за счет:

- оперативного переключения каналов на дневное - ночное наблюдение, исключая необходимость суточной замены штатного дневного прибора на штатный ночной прибор и наоборот;
- наблюдения обстановки из единой комфортной зоны без дополнительной регулировки сиденья БТТ;
- значительного увеличения дальности видения в ночных условиях в сравнении со штатным прибором ТВНЕ-1Б;
- автоматического включения помехозащитного режима в зависимости от освещенности на местности и возникающих световых помех, исключая необходимость ручной ре-

гулировки яркости изображения в поле зрения прибора при движении БТТ;

– обеспечения удобства наблюдения, особенно в ночной канал, с любого расстояния в пределах зоны обитаемости механика-водителя БТТ без необходимости фиксации головы налобником;

– расширения светового диапазона ночного канала до 20000 лк и обеспечения без потери видимости в прибор ТВК-1Б;

– возможности управления БТТ при различных значениях дневных и ночных освещенностей;

– легкой замены поврежденной головной призмы на запасную призму или на перископ для плавающих БТТ.

Приборы разработаны на базе ЭОП поколения 2+ или 3 с равномерным разрешением по полю зрения.

Сотрудничество с ведущими изготовителями боевых машин обеспечило прибору удобную в эксплуатации конструкцию, что подтверждено ходовыми испытаниями.

Дневно-ночные приборы ТВК охватывают оснащение практически всех основных видов БТТ.

На основе обобщения рекомендаций потребителей разработаны перспективные приборы ТВК-2, ТВК-3 [6]. Комбинированные дневно-ночные приборы водителя серии ТВК предназначены для замены штатных отдельных

дневных и ночных приборов водителя на бронетехнике российского производства.

При вождении бронетанковой техники возникают следующие задачи: обеспечение всепогодности, круглосуточной работы и высокой помехозащищенности. До настоящего времени для решения этих задач, боевые составы БМП и других видов бронетанковой техники использовали несколько комплектов перископических приборов, которые необходимо переустанавливать в зависимости от условий эксплуатации и боевой обстановки. Переустановка приборов занимает большой период времени, что влечет за собой снижение тактических характеристик бронетанковой техники.

Дневно-ночный прибор ТВК конструктивно представляет собой комбинированный дневно-ночной перископ, состоящий из двух каналов: оптического (дневного) и электронно-оптического (ночного), расположенных в одном моноблоке с общей головной призмой. конструкция прибора позволяет вести механику-водителю наблюдение не прикасаясь лбом к прибору, из комфортной зоны наблюдения, единой для дневного и ночного каналов. Переключение режимов работы прибора из дневного в ночной и наоборот осуществляется поворотом рукоятки, расположенной на правой боковой грани прибора (рис. 1). Общий вид прибора ТВК-1Б представлен на рис. 1 и рис. 2.



Рисунок 1.
Прибор ТВК-1Б



Рисунок 2.
Прибор ТВК-1Б с призмой
для форсирования водных преград

Дневной канал, предназначенный для наблюдения за местностью днем, состоит из верхней неподвижной призмы и нижней подвижной призмы.

Работа ночного канала основана на базе электронно-оптического преобразователя (ЭОП) отечественного производства, который изображение малой яркости, построенное на фотокатоде объективом, усиливает до яркости, достаточной для рассмотрения через лупу.

Ночной канал имеет два режима работы: пассивный и импульсный - помехозащитный. В пассивном режиме через прибор рассматриваются объекты, слабо освещенные естественным светом луны и звезд.

Помехозащитный режим работы обеспечивает работоспособность ночного канала прибора при повышенной освещенности местности, а так же при появлении в поле зрения световых помех (костры, фары и т.п.). Переход из пассивного режима в помехозащитный происходит автоматически при повышении естественной ночной освещенности (ЕНО) выше 1,5 лк. Помехозащитный режим работы ночного канала позволяет расширить диапазон его работы в зависимости от внешней освещенности до шести порядков.

Прибор разработан взамен штатных приборов ТНПО-170, ТВНЕ-1Б (ТВН-5Л2), ТНП-350Б.

Разработка проведена АО «Швабе-Приборы» совместно с АО «Швабе-Оборона и

Защита» за счет собственных средств в соответствии с ТЗ утвержденным АО «СКБМ» в рамках ОКР «Каркас».

Рабочей конструкторской документации прибора ТВК-1Б присвоена литера «О1» для серийного производства. Общий вид зоны обитания прибора ТВК-1Б представлен на рис. 3 и рис. 4.

В результате ОКР разработаны конструкторская и эксплуатационная документации на прибор ТВК-1Б. Полнота и качество разработанной документации была подтверждена изготовлением опытных образцов прибора ТВК-1Б, проведением предварительных, межведомственных и государственных испытаний модернизированной БМП.

Конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики прибора ТВК-1Б соответствуют ТЗ. В разработке использованы современная элементная база, оригинальные схемотехнические решения, соответствующие уровню мировых стандартов.

Дальнейшее развитие приборов серии ТВК предполагает совершенствование помехозащитных свойств наблюдения и автоматизации режимов работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование цифровых технологий в создании систем видеонаблюдения играет ключевую роль, так как позволяет реализовать значительно большее по сравнению с аналоговыми схемами количество функций

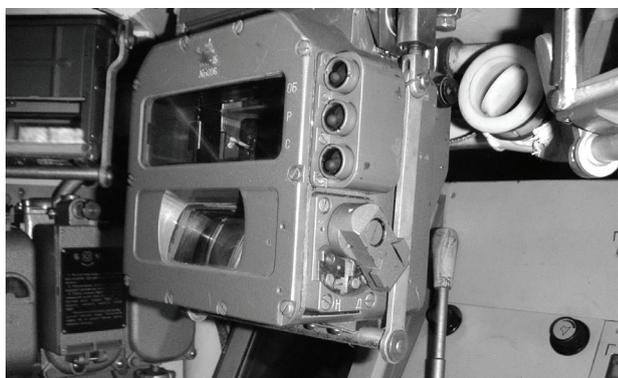


Рисунок 3.
ТВК-1Б в зоне обитания.
Органы управления прибором

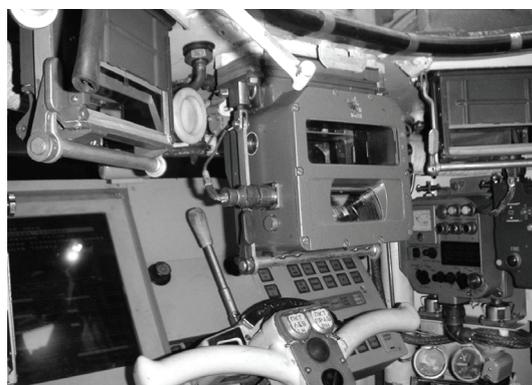


Рисунок 4.
ТВК-1Б в зоне обитания.
Место подключения прибора

автоматизации и управления процессом наблюдения контролируемых объектов.

Основные перспективы повышения информационной емкости ПНВ в состав, которого входит цифровой импульсный ЭОП, связаны с электронной и компьютерной обработкой информации. Информация, создаваемая цифровым импульсным ЭОП, повышает эффективность ПНВ в 1,5-2 раза. ПНВ в процессе развития приобрели характер поставщика информации, без которой в настоящее время невозможно производить исследования, вести боевые действия или организовать производство во многих отраслях. Безусловно, разработка цифрового импульсного ЭОП, это путь для создания интегрированных высоко технологичных систем, с использованием компьютеров и современных сетей, для организации производства и ведения боевых действий.

Разработка приборов обнаружения и распознавания объектов с использованием цифровых импульсных ЭОП с учетом наиболее полного преобразования информации во

всех элементах оптико-электронного тракта позволяет создать эффективные системы автоматического контроля для нужд ВС РФ.

Список литературы:

1. Дегтярёв П.А. Зависимость коэффициента преобразования электронно-оптического преобразователя с микроканальной пластиной от напряжений на электродах // Вестник Сибирского отделения Академии наук Высшей школы, 2002, № 1 (8)
2. Южик И.Б. Устройство ключевое // Патент № 27738
3. Всесуточный прибор механика водителя ТВК-1 http://www.npzoptics.ru/en/catalog/pribory_dlya_btt/tvk-1/
4. Южик И.Б., Артемов А.Д., Дейснер А.А. Вторичный источник питания для электронно-оптических преобразователей// Патент № 68779
5. Южик И.Б., Артемов А.Д., Дейснер А.А. Вторичный источник питания для электронно-оптических преобразователей// Патент № 45862
6. Всесуточный прибор механика водителя ТВК-3 http://www.npzoptics.ru/en/catalog/pribory_dlya_btt/tvk-3/

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВХОДНЫХ ОКОН СПЕЦИАЛЬНЫХ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

КОЛЕСОВА А.А., ПОЛЕССКИЙ А.В.

АО «НПО «Орион», г. Москва

E-mail: orion@orion-ir.ru

Приведены результаты расчета требований к качеству поверхностей входных окон матричных фотоприемных устройств, работающих в различных спектральных диапазонах спектра. Расчет был проведен на основе анализа допусков на качество изготовления поверхностей входных окон. Входное окно в расчете было представлено как плоскопараллельная пластина в синтезированных модельных оптических системах УФ- и ИК-диапазонов.

Ключевые слова: входное окно, общая ошибка, местная ошибка, матричное фотоприемное устройство, качество оптической поверхности.

Большинство современных несканирующих оптико-электронных систем построено на основе твердотельных матричных фотоприемных устройств (МФПУ). Несмотря на то, что подобные МФПУ не являются вакуумными приборами, зачастую им необходим вакуумированный, либо заполненный инертным газом герметичный корпус. Корпус служит для защиты фоточувствительной матрицы от воздействия окружающей среды, чье влияние может привести к деградации МФПУ.

Входное окно МФПУ представляет собой плоскопараллельную пластину и должно учитываться при расчете оптической системы (ОС) любого оптико-электронного прибора, поскольку может вносить aberrации. К входному окну, как и к любому оптическому элементу ОС, предъявляются требования к точности его изготовления. В рамках данного исследования нас интересовали такие параметры отклонения от плоскостности, как общая ошибка N и местная ошибка ΔN .

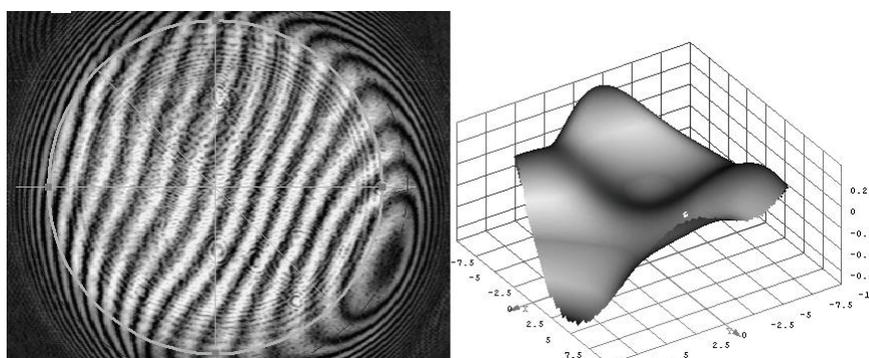


Рисунок 1.

Определение общей N (а) и местной ΔN (б) ошибок при контроле плоскостности полированных элементов

Отклонение поверхности входного окна от плоскости приводит к увеличению аберраций, расширению пятна рассеяния и падению частотно-контрастной характеристики.

Влияние качества поверхности входных окон охлаждаемых МФПУ с криостатируемыми корпусами было исследовано в [1].

Однако исследование не охватило все типы корпусов МФПУ. Поэтому была поставлена задача определения требований к качеству поверхностей входных окон неохлаждаемых фотоприемных устройств УФ (290...360 нм), ближнего ИК (0,9...1,7 мкм) и дальнего ИК (8...14 мкм) диапазонов спектра.

Стоит отметить, что входное окно, как плоскопараллельная пластина, просто в изготовлении и при контроле. Дополнительные ошибки возникают при его закреплении в корпусе – при производстве МФПУ не используются классические методы крепления, поскольку они не обеспечивают заданный уровень герметизации. Применение таких методов крепления входных окон, как пайка или клейка входного окна в корпус, приводит к деформации входных окон.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поскольку определение требований к отдельным оптическим компонентам оптических систем (ОС) может быть проведено только на основе анализа допусков на ОС в целом, то исследование необходимо проводить следующим образом:

1. Определить параметры объективов, которые влияют на требования к качеству входного окна, и определить значения этих

параметров для объективов УФ, ближнего и дальнего ИК диапазонов спектра.

2. Определить параметры входных окон современных МФПУ УФ и ИК диапазона спектра, производимых в России.

3. Синтезировать оптические системы УФ и ИК диапазона спектра по параметрам определенным в п.1 и 2.

4. Провести анализ допусков на оптическую систему и сформировать требования к точности соблюдения геометрии входных окон ФПУ.

Согласно [2] требования на точность изготовления оптических компонентов определяются:

- требованиями качеству изображения оптической системы;
- параметрами самого оптического компонента: толщиной, показателем преломления, оптической силой;
- параметрами работы оптического компонента: световой высотой, апертурой пучков на компоненте и его расположением.

Отсюда следует, что необходимо определить следующие параметры объективов: относительное отверстие, линейное поле изображения (определяется размером МФПУ), спектральный диапазон (определяется МФПУ) и качество изображения.

Анализ продукции ведущих Российских и мировых производителей [3, 4, 5, 6, 7, 8, 10] показывает, что современные объективы УФ и ИК диапазона спектра, применяемые совместно с неохлаждаемыми МФПУ имеют следующие параметры (таблицы 1, 2, 3).

Таблица 1.
Объективы УФ диапазона спектра

Наименование		Величина
Относительное отверстие, не более		1:1,8*
Линейное поле зрения ($2\gamma'$), мм не более		11,3
Спектральный диапазон		290...380
Качество изображения, л/мм (контраст 0,3)	Центр поля	50
	Край поля	30

* для большинства УФ объективов относительное отверстие менее 1:3

Таблица 2.
Объективы коротковолнового ИК диапазона

Наименование	Величина
Относительное отверстие, не более	1:1,4
Линейное поле зрения ($2\gamma'$), мм не более	20,5
Спектральный диапазон, нм	800-1700
Качество изображения, л/мм (контраст 0,45) при $D/f^* = 1:1,4$	25
Качество изображения, л/мм (контраст 0,45) при $D/f^* = 1:2$	35

Таблица 3.
Объективы длинноволнового ИК диапазона (для неохлаждаемых ФПУ)

Наименование	Величина
Относительное отверстие, не более	1:0,9
Линейное поле зрения ($2\gamma'$), мм не более	~11,3
Спектральный диапазон, мкм	8...14
Число Штреля, не менее	0,85

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВХОДНЫХ ОКОН СОВРЕМЕННЫХ МФПУ

Результаты анализа данных о входных окнах и размерах фоточувствительных элементов неохлаждаемых МФПУ Российских производителей для ультрафиолетового, коротковолнового и длинноволнового ИК диапазонов приведены в таблице 4 [3, 7, 8].

СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УФ И ИК ДИАПАЗОНОВ СПЕКТРА

В результате анализа отечественных оптических трактов и оптических схем МФПУ были сформулированы следующие исходные данные для синтеза оптических систем (таблица 5):

Таблица 4.
Данные по неохлаждаемым ФПУ, производимым в России

Параметры	Величина
Толщина входного окна	1
Материал входного окна	Лейкосапфир, Германий*
Расстояние от входного окна до ФЧЭ	~ 4 мм
Диаметр входного окна	~ 20 мм
Размер диагонали ФПУ	11,3

* - применяется для матричных ФПУ диапазона 8...14 мкм

Таблица 5.
Требования к синтезируемым ОС

№	$\Delta\lambda$, мкм	D/f^*	$2\gamma'$, мм	Качество изображения	Толщина входного окна	Материал входного окна	Расстояние от ФЧЭ
1	0,29...0,38	1:2,3	11,3	~40л/мм, контраст 0,3	1	Лейкосапфир	4
2	0,9...1,7	1:1,8	11,3	~40л/мм, контраст 0,45	1	Лейкосапфир	4
3	8...14	1:0,9	11,3	Число Штреля не менее 0,85	1	Германий	2,5

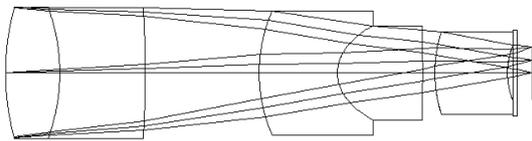


Рисунок 2.
Схема ОС спектрального диапазона
0,29...0,38 мкм, $D/f' = 1:2,3$

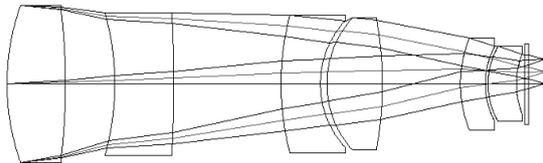


Рисунок 3.
Схема ОС спектрального диапазона
0,9...1,7 мкм, $D/f' = 1:1,8$

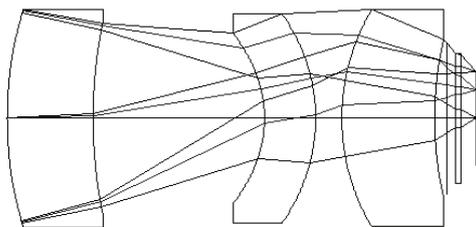


Рисунок 4.
Схема ОС спектрального диапазона
8... 14 мкм, $D/f' = 1:1,8$

При синтезе оптических систем требования к количеству и материалу компонентов, применению асферических поверхностей, градиентных и дифракционных элементов не предъявлялись.

Оптические схемы синтезированных систем приведены на рисунках 1...3, а их характеристики представлены в таблице 6. Синтез проводился с использованием возможностей САПР Zemax.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТОЧНОСТНОГО АНАЛИЗА И ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ ПОВЕРХНОСТИ ВХОДНЫХ ОКОН НЕОХЛАЖДАЕМЫХ МФПУ

После синтеза систем был проведен расчет допусков в программе Zemax и определены предельные допустимые значения погрешностей изготовления поверхностей входных окон N и ΔN . После определения погрешностей изготовления поверхностей был проведен анализ методом Монте Карло влияния качества изготовления поверхностей входных окон на изменение качества синтезированных оптических систем, который позволил сформировать требования к качеству изготовления поверхностей входных окон. Результаты приведены в таблицах 7–9.

Таблица 6.
Требования к синтезируемым ОС

№	$\Delta\lambda$, мкм	D/f'	Число Штреля (центр поля/ край поля)	Частота по уровню контраста 0,3 (для системы №2 по уровню контраста 0,45) л/мм (центр поля/край поля)	Диаметр пятна рассеяния по уровню 80% энергии (центр поля/край поля)*, мкм	Примеч.
1	0,29 ... 0,38	1:2,3	—	124/160	16,6/13,8	Рисунок 1
2	0,9 ... 1,7	1:1,8	0,46/0,2	67/51	12,6/15,4	Рисунок 2
3	8 ... 14	1:0,9	0,93/0,9	50,5/45,5	19/22	Рисунок 3

*– данные приведены для плоскости наилучшей установки

Таблица 7.

Параметры качества входных окон и их влияние на качество ОС $\Delta \lambda = 0,29 \dots 0,38$ мкм

№	N*	ΔN^*	Число Штреля (центр поля / край поля)	Частота по уровню контраста 0,45 л/мм (центр поля / край поля)**	Диаметр пятна рассеяния по уровню 80% энергии (центр поля / край поля)**, мкм
1	1	1	0,45/0,18	67/51	12,6/15,4
2	2	2	0,45/0,16	67/51	12,6/15,4
3	3	1	0,45/0,18	67/51	12,6/15,4
4	3	2	0,45/0,17	67/51	12,6/15,4
5	5	1	0,45/0,19	67/51	12,6/15,4
6	5	2	0,45/0,17	67/51	12,6/15,4

* – данные приведены для $\lambda = 0,6328$ мкм и диаметра входного окна 20 мм;

** – данные приведены для плоскости наилучшей установки

Таблица 8.

Параметры качества входных окон и влияние их на качество ОС $\Delta \lambda = 0,9 \dots 1,7$ мкм

№	N*	ΔN^*	Число Штреля (центр поля / край поля)	Частота по уровню контраста 0,45 л/мм (центр поля / край поля)**	Диаметр пятна рассеяния по уровню 80% энергии (центр поля / край поля)**, мкм
1	1	1	0,45/0,18	67/51	12,6/15,4
2	2	2	0,45/0,16	67/51	12,6/15,4
3	3	1	0,45/0,18	67/51	12,6/15,4
4	3	2	0,45/0,17	67/51	12,6/15,4
5	5	1	0,45/0,19	67/51	12,6/15,4
6	5	2	0,45/0,17	67/51	12,6/15,4

* – данные приведены для $\lambda = 0,6328$ мкм и диаметра входного окна 20 мм;

** – данные приведены для плоскости наилучшей установки

Таблица 9.

Параметры качества ходных окон и влияние их на качество ОС $\Delta \lambda = 8 \dots 14$ мкм

№	N*	ΔN^*	Число Штреля (центр поля / край поля)	Частота по уровню контраста 0,3 л/мм (центр поля / край поля)**	Диаметр пятна рассеяния по уровню 80% энергии (центр поля / край поля)**, мкм
1	1	1	0,933/0,896	50,5/45,5	19/22
2	2	2	0,934/0,895	50,5/45,5	19/22
3	3	1	0,935/0,887	51/45,5	19/22
4	3	2	0,935/0,887	51/44,5	19/22
5	5	1	0,935/0,893	51/44,5	19/22
6	5	2	0,936/0,883	51/44,5	19/22

* – данные приведены для $\lambda = 0,6328$ мкм и диаметра входного окна 20 мм;

** – данные приведены для плоскости наилучшей установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что требования, предъявляемые к форме поверхности входных окон неохлаждаемых матричных ФПУ ультрафиолетового, коротковолнового и длинноволнового ИК диапазонов спектра, сравнительно невысоки (общая ошибка $N=5$, местная ошибка $\Delta N=2$).

Такие результаты можно объяснить малой высотой апертурного пучка на входном окне [9]. Данный параметр используется при расчетах допусков [2] и обратно пропорционален их величине. В свою очередь, малая высота апертурного пучка на входном окне объясняется рядом особенностей неохлаждаемых МФПУ и оптических систем, используемых совместно с ними.

Входное окно в таких системах расположено близко к плоскости ФЧЭ и удалено от апертурной диафрагмы (и/или её изображения – выходного зрачка), которая, как правило, находится практически в «бесконечности». Такое расположение диафрагмы выбирается разработчиками оптических систем благодаря тому, что оно позволяет создать равномерную засветку поверхности фоточувствительного элемента. Похожий ход лучей имеют приведенные выше оптические системы (модельный).

Стоит отметить, что пятно рассеяния синтезированных для моделирования систем составляет примерно 15 мкм и, следовательно, полученные результаты верны для матричных МФПУ с шагом не только 30×30 мкм, но и 15×15 мкм.

Однако, несмотря на относительно невысокие требования к деформации входных окон, в процессе изготовления МФПУ необходим контроль качества поверхностей входных окон МФПУ интерференционным методом ввиду того, что некоторые технологические процессы могут привести к дополнительным деформациям входного окна МФПУ.

Список литературы:

1. Губайдуллин Р.Н., Колесова А.А., Лобачев А.В. и др. // Прикладная физика. 2015. №2. С. 104.
2. Иванов А.Н. Проектирование узлов оптико-электронных приборов. Методические указания к выполнению курсового проекта. Учебное пособие – СПб: НИУ ИТМО, 2013.
3. Швабе: [Электронный ресурс]. Е., 2014. URL: <http://www.shvabe.com>. (Дата обращения: 18.01.2015).
4. Объектив Nikon UV Nikkor 105mm/f4: [Электронный ресурс]. Germany, 2015. URL http://lensclub.ru/lenses/item/c_3406.html (Дата обращения: 10.02.2015).
5. The Macrolens Collection Database : [Электронный ресурс]. М., 2015. URL http://www.macrolenses.de/ml_detail_sl.php?ObjektiveNr=301
6. Колесова А.А., Полесский А. В, Хамидуллин К.А. и др. // Прикладная физика. 2013. №5. С. 63.
7. Бурлаков И.Д., Болтарь К.О., Яковлева Н.И. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 344.
8. Бурлаков И.Д., Гринченко Л.Я., Дирочка А. И. и др. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.
9. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. – 3-е изд, перераб. доп. – М.: Машиностроение, 1992.
10. Austin Richards. Across the UV spectrum// Advanced imaging magazine, June, 2008. С. 10

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕМБРАННО-ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ СИСТЕМ РАЗГРУЗКИ ВЫСОКОТОЧНОЙ ОПТИКИ

ГОРШКОВ В.А., КАСПАРОВА Е.Г., КОРНЕЕВ Н.Г., ЛЕОНТЬЕВ А.А.

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Оптика», г. Москва

E-mail: optical@npooptica.ru

В статье описаны системы разгрузок высокоточной оптики, разработанные в АО «НПО «Оптика». Описана технология изготовления резинотканевых мембран, методика аттестации мембранно-пневматических элементов, система стабилизации положения зеркала на системе разгрузки.

Ключевые слова: аттестация, мембрана, опора, система разгрузки.

При контроле высокоточной оптики в технологическом цикле ее изготовления необходимо снизить деформацию оптической детали (ОД) от собственного веса до величины, не превышающей требования чертежа на точность формы ее рабочей поверхности.

Снижение деформации высокоточной оптики обеспечивается применением многоопорной системы разгрузки (СР) (Гребя, Лас-саля, гидравлических или пневматических опор, объединенных в единую гидро- или пневмосистему и т.п.).

В технологических СР целесообразно при-

менение гидравлических или пневматических опор, не имеющих узлов трения, например, сильфон, т.к. такие СР могут быть использованы для базирования ОД на станке при обработке абразивными материалами. В технологическом цикле изготовления ОД перемещается с позиции обработки на позицию контроля вместе с технологической СР.

Впервые в России многоопорная технологическая система разгрузки была разработана и применена при изготовлении 6-ти метрового зеркала Большого Телескопа Альт-Азимутального (БТА) (рис. 1, рис. 2).



Рисунок 1.

Сильфонно-гидравлическая технологическая система разгрузки главного зеркала Большого Телескопа Альт-Азимутального

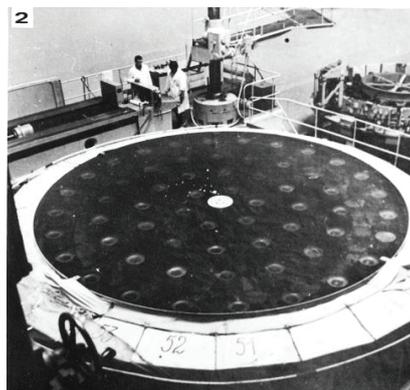


Рисунок 2.

Главное зеркало Большого Телескопа Альт-Азимутального на технологической системе разгрузки

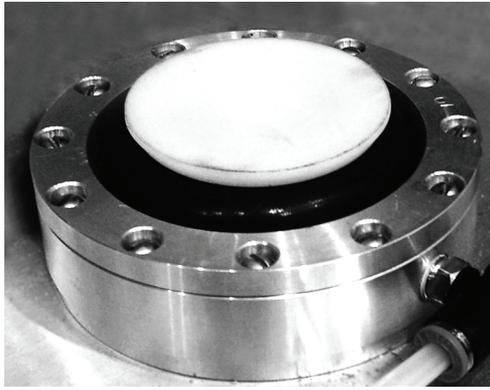


Рисунок 3.

Мембранно-пневматический элемент для системы разгрузки высокоточной оптики

В данной СР в качестве исполнительных элементов были применены сильфонные гидравлические опоры, объединенные в единую гидросистему.

По мере совершенствования оптических систем, создания конструкций с облегченными, тонкими, адаптивными главными зеркалами, повышались требования к исполнительным элементам СР. Основной функцией многоопорной СР является воздействие на зеркало минимально отличающихся друг от друга дискретных реактивных усилий, которые развиваются исполнительными элементами, объединенными в единую гидро- или

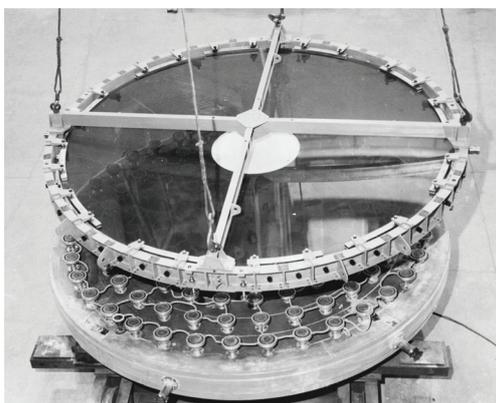


Рисунок 4.

Установка тонкого адаптивного зеркала Ø 3300 мм на систему мембранно-пневматической разгрузки

пневмосистему под действием веса зеркала.

Сильфонные элементы имели слишком большую собственную жесткость, поэтому возникла необходимость разработки опор СР с минимальной собственной жесткостью.

Одним из решений снижения разброса разгружающих усилий является применение в СР мембранно-пневматических элементов (МПЭ).

МПЭ (рис. 3) представляет собой металлический корпус, в котором установлена резинотканевая мембрана, с обеспечением герметичности подмембранной полости. В корпусе установлен штуцер для соединения МПЭ в единую пневмосистему.

В восьмидесятые годы прошлого века в АО «НПО «Оптика» были разработаны, изготовлены и испытаны МПЭ СР [1]. С их применением были созданы СР облегченных зеркал оптических систем космического базирования с главным зеркалом Φ 1540 мм, перспективных тонких адаптивных зеркал диаметром 1550 мм и 3300 мм (рис. 4).

Резинотканевые мембраны изготавливало по кооперации специализированное предприятие резиновой промышленности.

Резинотканевая мембрана (рис. 5) представляет собой монолитную деталь, изготовленную на вулканизационном прессе. Мембрана имеет уплотнительное кольцо для обеспечения герметичности при сборке МПЭ, тороидальный гофр для обеспечения рабочего хода мембраны и плоскую поверхность, на которую устанавливается ОД. Для устранения растяжения мембраны при работе в СР она армирована тканью.

В дальнейшем кооперация была разрушена, технология производства резинотканевых мембран, разработанных АО «НПО «Оптика» утрачена.

В настоящее время АО «НПО «Оптика» на основе собственной технологической базы восстановило технологический процесс изготовления резинотканевых мембран различных конструкций.

К резинотканевым мембранам предъявлялись следующие технические требования:

- рабочая среда «воздух-воздух»;
- температура окружающей среды $+10 \div +45^{\circ}\text{C}$;
- давление окружающей среды $1,0 \text{ кг/см}^2$;
- давление воздуха в подмембранной полости при испытаниях МПЭ $3,0 \text{ кг/см}^2$;
- рабочий ход мембраны $4,0 \text{ мм}$.

Для изготовления резинотканевых мембран, отвечающих предъявленным техническим требованиям, была использована капроновая техническая ткань с высокой прочностью и повышенной эластичностью, обеспечивающая равномерное растяжение мембранного полотна. Так как прочность связи резиновой смеси с тканью низкая, с целью повышения адгезии ткань подвергли дополнительной обработке пропиточной эпоксидной смолой.

При создании покрывного слоя мембраны использовался хлоропреновый каучук, обладающий высокой адгезией к ткани и повышенной устойчивостью к старению. На его основе была изготовлена резиновая смесь [2].

Мембранное полотно изготавливалось шпредингованием (пропиткой ткани растворами резиновой смеси с наличием растворителей этилацетат/толуол) на клеепромазочной машине в несколько слоев с последующим каландрованием полученного полотна с целью обеспечения равномерности резинового покрытия [3].

Прессовка резинотканевых мембран осуществлялась на вулканизационном прессе с выдержкой определенной температуры, времени прессования и давления.

Конструирование многоопорной СР начинается с математического моделирования, целью которого является оптимизация количества элементов разгрузки и их расположения.

Количество элементов СР определяет величина деформации рабочей поверхности ОД между опорами, которая должна быть на порядок меньше требования чертежа к форме ее рабочей поверхности. Расположение опор определяется равномерностью распределения межопорных прогибов по всей ра-



Рисунок 5.
Резинотканевая мембрана

бочей поверхности ОД.

Результат оптимизации СР облегченного зеркала диаметром 700 мм с требованиями чертежа к точности рабочей поверхности $PV=0,2\lambda$; $СКО - 0,0251$, где $\lambda=0,6328 \text{ мкм}$, приведен на рис. 6.

По результатам оптимизации изготовлена СР на основе МПЭ (рис. 7).

Зеркало установлено на 18-ти оптимально расположенных опорах разгрузки (рис. 8). Деформация зеркала составила $PV=0,01\lambda$; $СКО - 0,0022\lambda$, что на порядок лучше требований чертежа.

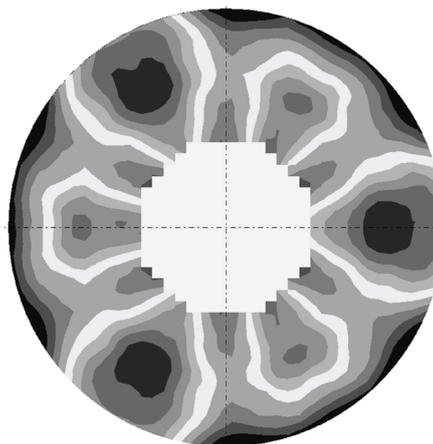


Рисунок 6.
Топографическая карта деформации рабочей поверхности облегченного зеркала, установленного на 18 опорах
 $PV=0,01\lambda$, $СКО - 0,0022\lambda$



Рисунок 7.

Мембранно-пневматическая технологическая система разгрузки облегченного зеркала

Для аттестации МПЭ был разработан и изготовлен электронно-механический стенд (рис. 9).

Стенд состоит из механического блока для установки и нагружения аттестуемого МПЭ, электронно-пневматического блока регулирования давления в МПЭ, бесконтактного триангуляционного датчика измерения положения.

Стенд работает следующим образом: на механический блок устанавливается МПЭ, подмембранная полость которого соединяется с блоком регулирования давления, запрограммированным на стабильное поддержание величины рабочего давления СР, МПЭ поднимает рамку нагружающего устройства, бесконтактным датчиком измеряется высота МПЭ (размер от плоскости, на которую установлена МПЭ до поверхности МПЭ, на которую устанавливается ОД).



Рисунок 8.

Облегченное зеркало на технологической системе разгрузки

Величина рабочего давления в СР определялась следующим образом: на стенд устанавливался единственный МПЭ из СР и нагружался грузом, соответствующим рабочей нагрузке. Автоматической системой регулирования давления производилось изменение давления в подмембранной полости, при этом бесконтактным датчиком фиксировалась высота данной МПЭ. Полученная экспериментальная характеристика приведена на рис. 10. В центральной зоне данной характеристики на линейном участке выбиралась рабочая величина давления в МПЭ, используемого в дальнейшем для аттестации системы разгрузки.

Аттестация МПЭ заключалась в измерении высот всех МПЭ СР при рабочей нагрузке и выбранном давлении и установке под МПЭ компенсаторов (плоско-параллельных пластин), выравнивающих высоты МПЭ в один размер.

Для стабилизации этого размера при эксплуатации СР при изменении внешних условий (температура, давление) предусмотрена система стабилизации положения зеркала.

Система состоит из датчика положения зеркала над основанием оправы и исполнительных механизмов пневмосистемы, которые при изменении размера между зеркалом и основанием оправы подают в систему воздух от внешнего источника либо стравливают воздух в атмосферу по команде от датчика.

Восстановленный в АО «НПО «Оптика» технологический процесс изготовления резинотканевых мембран с минимальной собственной жесткостью, изготовленное оборудование: стенд для аттестации МПЭ, система стабилизации положения зеркала, обеспечили снижение разброса разгружающих усилий в изготавливаемых СР до $1 \div 2\%$, что в совокупности с математическим моделированием оптимизации количества и расположения МПЭ позволяет изготавливать СР для облегченной, тонкой, адаптивной высокоточной оптики с требованиями к форме ее рабочей поверхности $\lambda/60 \div \lambda/100$, (при $\lambda = 0,6328$ мкм).

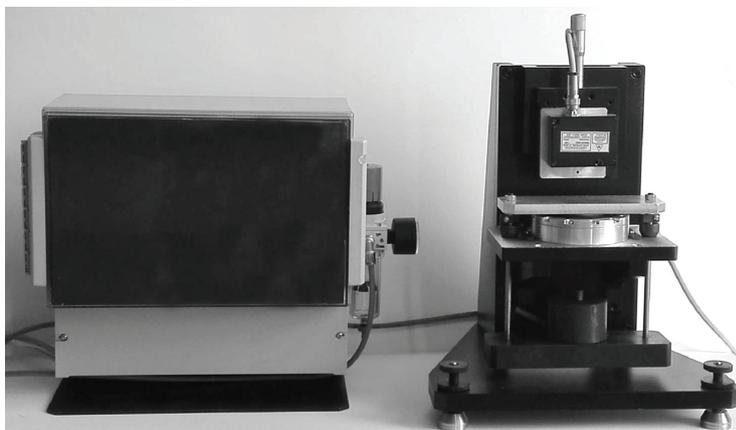


Рисунок 9.
Стенд аттестации мембранно-пневматических элементов

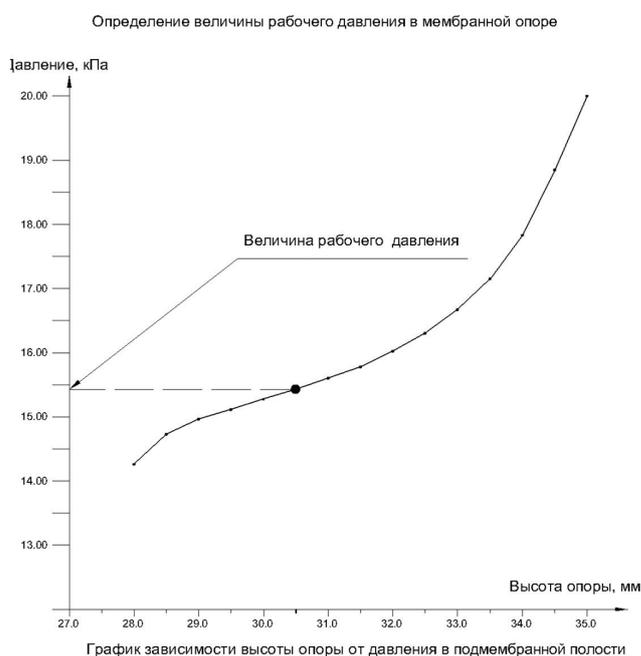


Рисунок 10.
График мембраны

Список литературы:

1. В.М. Шпиндлер, А.А. Леонтьев, Н.Г. Корнеев, А.В. Чулюкина. Исследование характеристик тарельчато-гофрированной мембраны. // Каучук и резина, №10, 1988 г., С.27-28.
2. И.А. Соснина, А.Е. Корнев. Технология эла-

стомерных материалов. //2000. С. 288

3. А.В. Шуваева. Резинотканевые мембранные материалы на основе гидрированных бутадиен-нитрильных каучуков. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2011. С.16.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ЛИНЗ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ВАСИЛЬЕВА Е.Ю., ГОРШКОВ В.А., ЩЕННИКОВА Т.И., МОРОЗОВА А.В.

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Оптика», г. Москва

E-mail: optical@nprooptica.ru

В статье рассматривается способ изготовления и контроля преобразователя лазерного излучения, формирующего пучок с равномерным распределением интенсивности, состоящего из двух асферических линз, профили поверхностей которых описываются уравнениями высшего порядка. Проводится анализ влияния ошибки асферизации на распределение интенсивности в выходном пучке.

Ключевые слова: формообразование, асферическая оптика, преобразователь лазерного излучения.

Во многих сферах науки и производства стала актуальной задача формирования определенного профиля интенсивности лазерного пучка. Большинство лазеров формируют гауссовый пучок. Однако зачастую необходимо равномерное распределение интенсивности по всему световому пучку (рис. 1). Пучок с таким распределением интенсивности называется супергауссовым и применяется для сварки металлических и пластиковых деталей, голографии, маркировки и гравировки, микрообработки материалов, биомедицинском освещении, анализа размера частиц и в других областях. [1]

Преобразователь гауссова пучка в супергауссов позволяет преобразовывать лазер-

ное излучение с гауссовым распределением интенсивности в коллимированный пучок с равномерным распределением интенсивности. Существует несколько методов формирования лазерного пучка требуемой формы, в том числе простые отверстия, которые вырезают наиболее плоскую часть лазерного пучка, дифракционные оптические элементы, линзы и зеркала. Выбор тех или иных методов зависит от оптических и конструктивных задач и различных технологий преобразования излучения. [2]

Одним из способов создания равномерного распределения интенсивности является использование оптических систем, состоящих из преломляющих поверхностей. Оптическая схема такого преобразователя представлена на рис. 2. Как правило, первая линза по ходу излучения является плоско-вогнутой с асферической поверхностью (рис. 3а), а вторая – плоско-выпуклой асферической линзой (рис. 3б). Профили асферических поверхностей линз описываются уравнениями высшего порядка. Отступление асферического профиля поверхности от профиля ближайшей сферы составляет десятки – сотни микрометров. Например, для преобразователя с расстоянием между оптическими элементами 96,5 мм асферичность

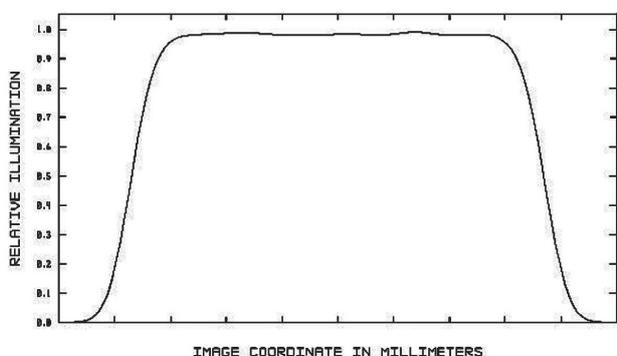


Рисунок 1.

Распределение интенсивности в пучке

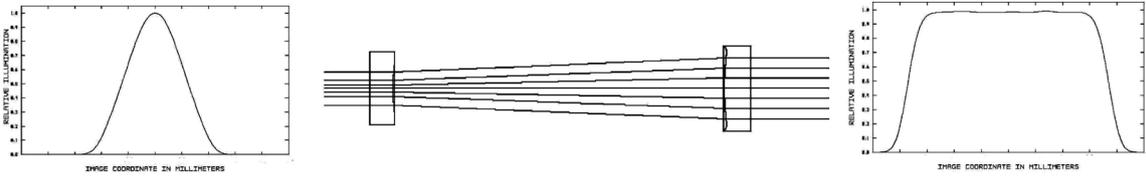


Рисунок 2.
Оптическая схема преобразователя

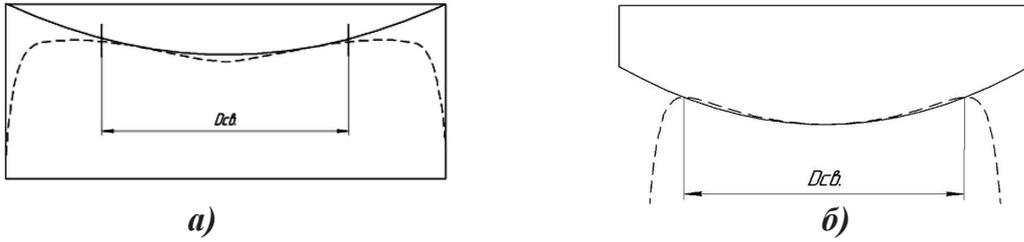


Рисунок 3.
Профиль асферической поверхности: а) вогнутой линзы, б) выпуклой линзы

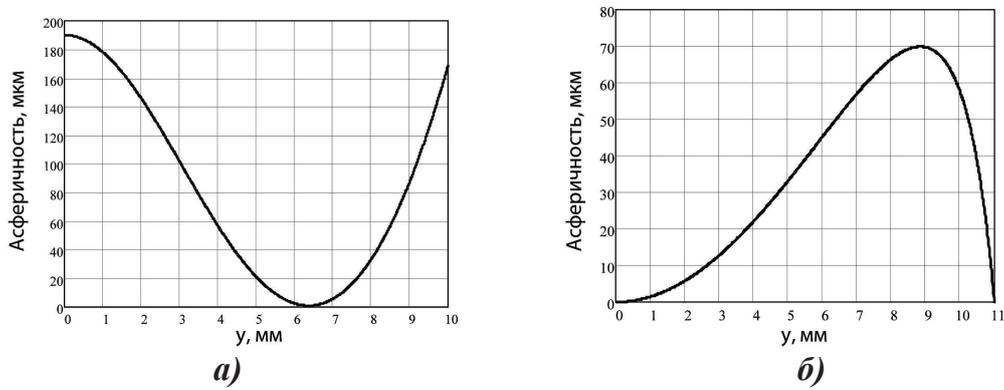


Рисунок 4.
Асферичность: а) вогнутой линзы, б) выпуклой линзы

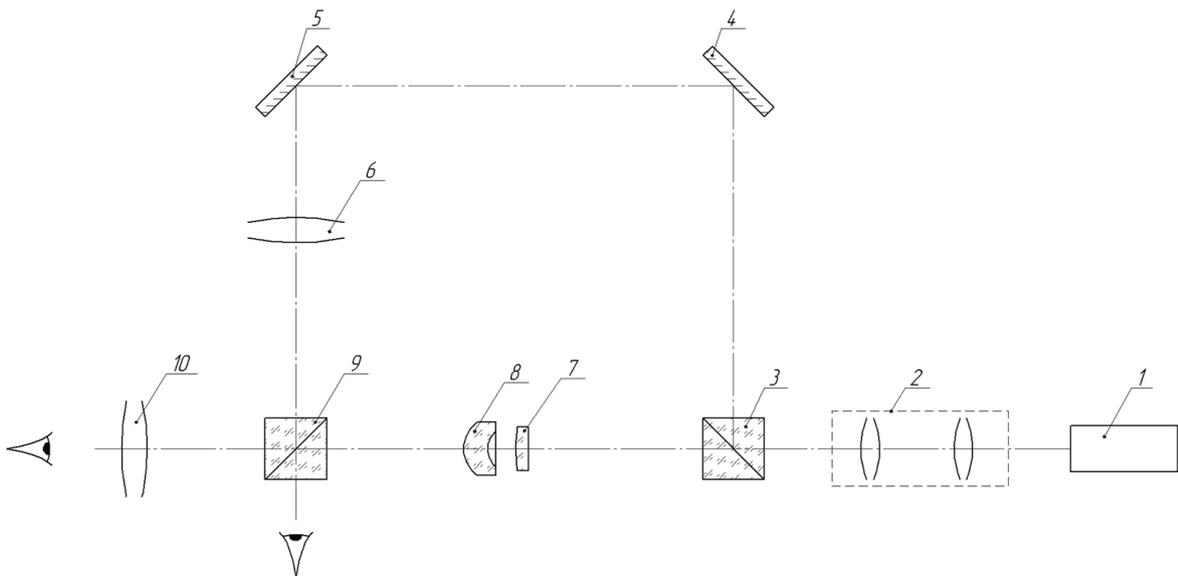


Рисунок 5.
Схема контроля плоско-выпуклой линзы:
1 – лазер, 2 – расширитель лазерного пучка, 3, 9 – куб-призма, 4, 5 – зеркала, 6, 10 – объектив, 7 – контролируемая линза, 8 – компенсатор

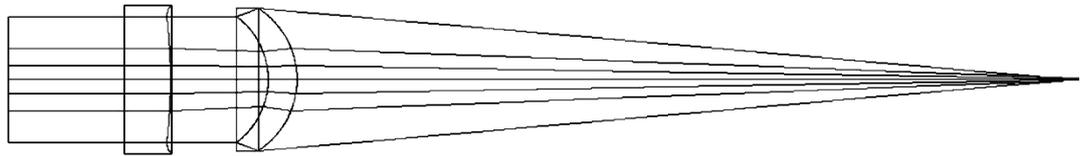


Рисунок 6.

Плоско-выпуклая линза совместно с компенсатором

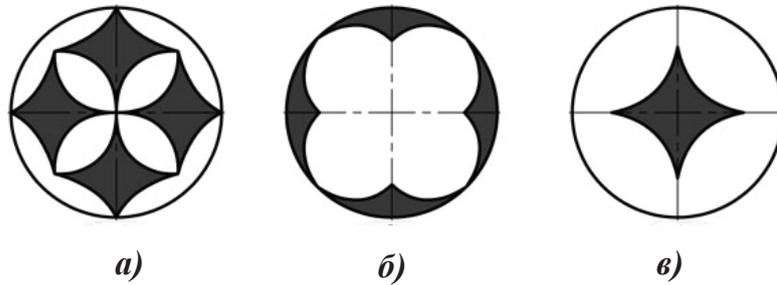


Рисунок 7.

«Инструмент - маска»

плоско-вогнутой линзы составляет 190 мкм (рис. 4а), а плоско-выпуклой линзы составляет 70 мкм (рис. 4б). Такие асферичность поверхностей и градиент асферичности представляют сложность при изготовлении оптических элементов.

Контроль асферических линз преобразователя осуществляется интерференционным методом с применением нуль-корректоров волновых aberrаций. Расчет нуль-корректора проводится для одной из линз (плоско-выпуклой, имеющей меньшую

асферичность). Вторая линза контролируется совместно с изготовленной первой линзой в схеме самого преобразователя лазерного излучения.

Контроль проводится по схеме, представленной на рис. 5 с помощью однолинзового нуль-корректора, который совместно с изготавливаемой линзой преобразует плоский волновой фронт в сферический (рис. 6). Одним из способов изготовления линзы является формообразование с помощью «инструмента-маски» на станке серии ШП [3].

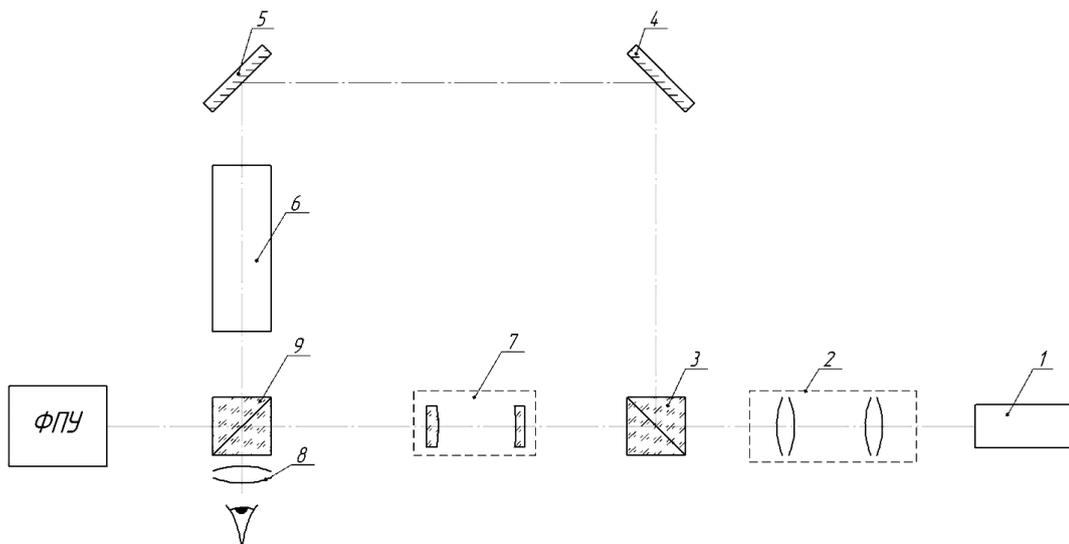


Рисунок 8.

Схема контроля плоско-вогнутой линзы:

1 – лазер, 2 – расширитель лазерного пучка, 3, 9 – куб-призма, 4, 5 – зеркала, 6 – телескопическая система, 7 – преобразователь, 8 – объектив

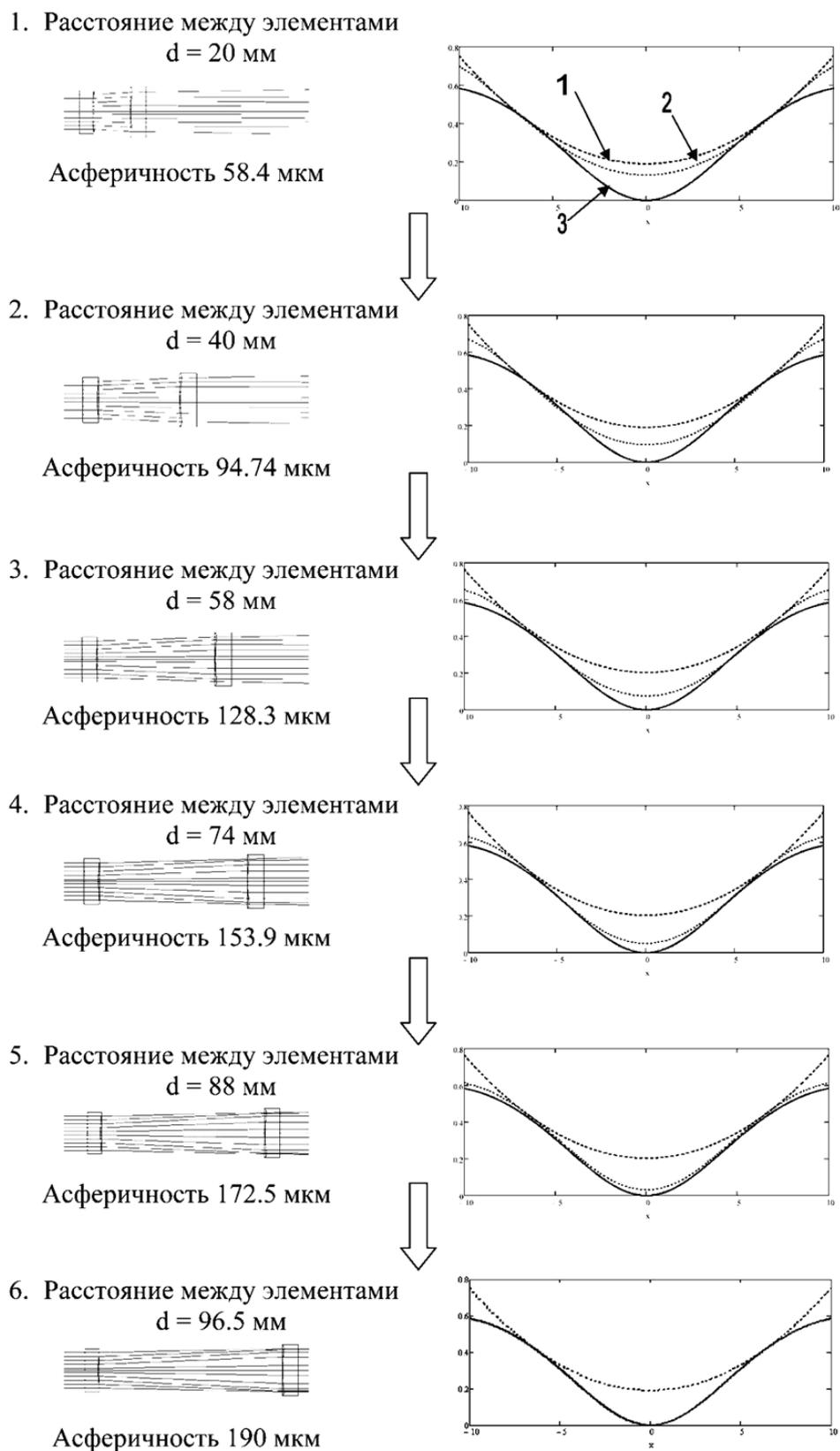


Рисунок 9.

Этапы контроля плоско-вогнутой линзы:

1 – профиль ближайшей сферической поверхности, 2 – профиль асферической поверхности при расстоянии между элементами равном d , 3 – теоретический профиль асферической поверхности

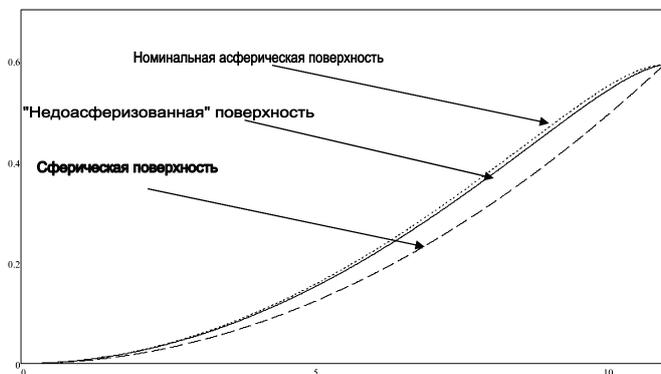


Рисунок 10.
Ошибка асферизации

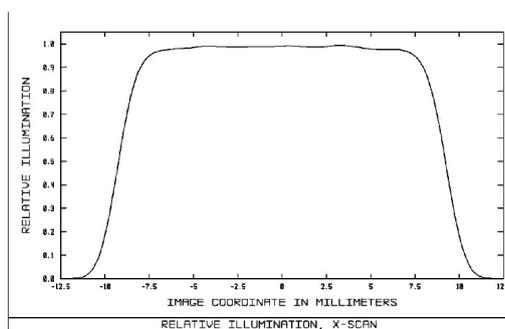
На рис. 7а представлен пример «маски» для формообразования линзы с асферичностью, представленной на рис. 4б. В зависимости от результатов контроля следует проводить коррекцию формы инструмента.

Изготовление плоско-вогнутой линзы проводится на станках серии ШП аналогичным способом. На рис. 7(б, в) представлены примеры «масок» для формообразования линзы с асферичностью, представленной на рис. 4а. Ввиду большой асферичности плоско-вогнутой линзы возможно использование

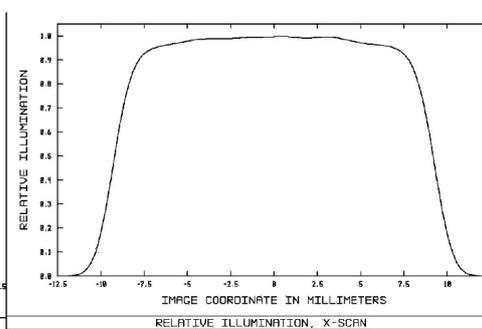
ионно-лучевого формообразования с использованием ионного источника ИЛО–200 разработки АО «НПО «Оптика» и серии «инструментов-масок». Производительность такого процесса составляет примерно 1 мкм в час.

Как было сказано ранее, для контроля плоско-вогнутой линзы используется изготовленная плоско-выпуклая линза. В таком случае мы можем сразу контролировать суммарные aberrации всего прибора. Схема контроля плоско-вогнутой линзы представлена на рис.8. По этой схеме можно контролировать ошибку волнового фронта и одновременно распределение интенсивности в выходном пучке с помощью фотоприемного устройства. Для асферизации поверхности в схеме контроля с плоско-вогнутой линзой проводится контроль при варьированном расстоянии между линзами с целью уменьшения волновых aberrаций всего прибора. На рис. 9 представлены возможные этапы контроля плоско-вогнутой линзы с асферичностью 190 мкм для преобразователя с

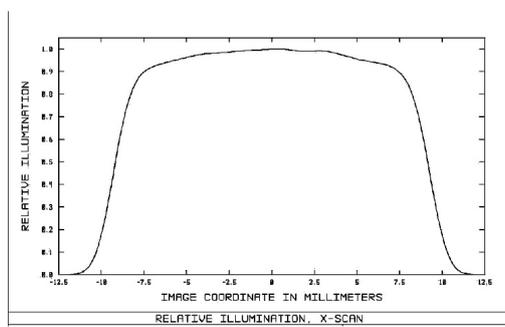
Ошибка асферизации 1 мкм:



Ошибка асферизации 3 мкм:



Ошибка асферизации 5 мкм:



Ошибка асферизации 10 мкм:

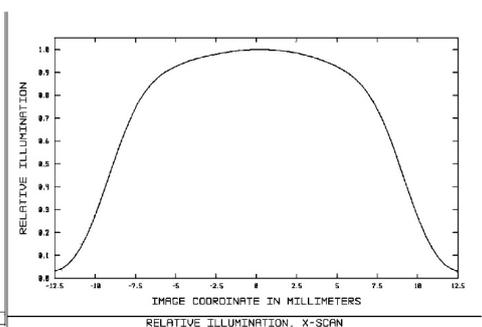


Рисунок 11.
Влияние ошибки асферизации на распределение интенсивности

расстоянием между линзами 96.5 мм. Как видно из этого рисунка, контроль удобно проводить за 6 положений линз относительно друг друга.

Рассмотрим влияние ошибки асферизации на распределение интенсивности в выходном пучке. Поскольку профиль поверхности одной линзы однозначно зависит от профиля поверхности второй, нужно рассмотреть влияние ошибки асферизации только той линзы, которая изготавливается первой. Вторая же линза будет менять профиль поверхности в зависимости от ошибки первой линзы для компенсации волновых aberrаций всего прибора. Таким образом, нам следует рассмотреть ошибку асферизации плоско-выпуклой линзы. Ошибка асферизации представлена на рис. 10. Распределение интенсивности в выходном пучке при недоасферизации в случае компенсации вогнутой линзой aberrаций выпуклой линзы представлены на рис. 11. В качестве критерия возьмем количество энергии в выходном пучке (рис. 12). Как видно из рисунка, для того, чтобы в пучке содержалось энергии не менее 95%, ошибка асферизации не должна превышать 2,8 мкм.

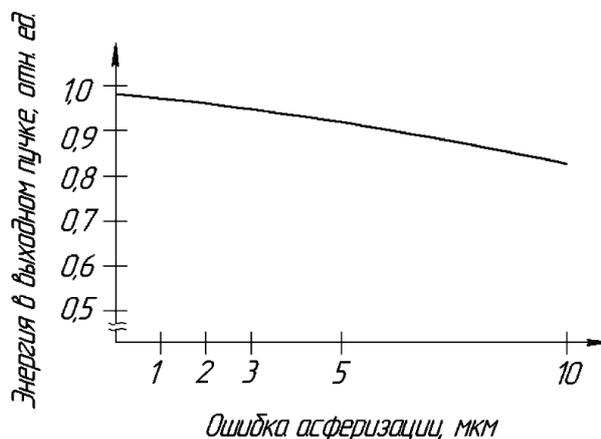


Рисунок 12.

Влияние ошибки асферизации на количество энергии в выходном пучке

Конструкция преобразователя, разработанного в АО «НПО «Оптика» представлена на рис. 13.

Преобразователь устанавливается в юстировочный кронштейн, который необходим для юстировки прибора. Схема юстировки представлена на рис. 14. Для подготовки прибора к работе устанавливается эталонное зеркало и в отсутствие преобразователя направляется лазерный пучок от источника излучения на плоское зеркало.

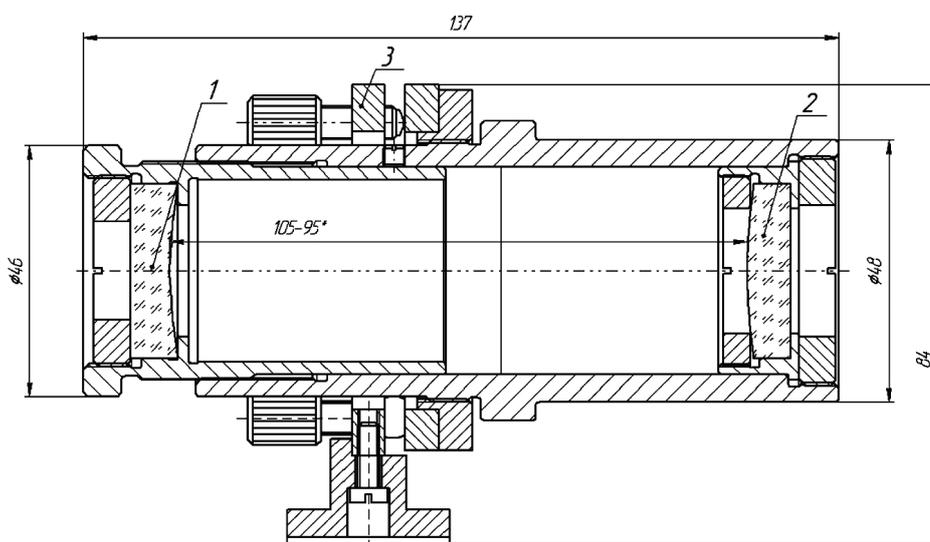


Рисунок 13.

Конструкция преобразователя лазерного излучения:

1 – плоско-вогнутая линза в корпусе, 2 – плоско-выпуклая линза в корпусе, 3 – кронштейн

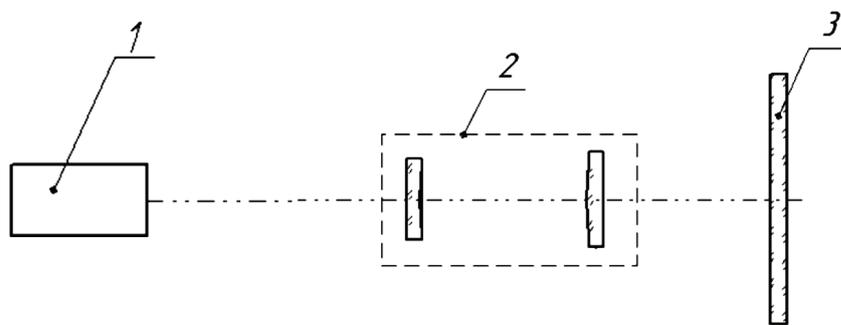


Рисунок 14.

Схема юстировки преобразователя:

**1 – лазерный источник излучения,
2 – преобразователь гауссова пучка в супергауссов,
3 – зеркало плоское**

Необходимо обеспечить автоколлимацию излучения от плоского зеркала. Критерием автоколлимации является совмещение отраженного пучка лучей от плоского зеркала с пучком лучей, выходящим из лазера на его выходном торце. Затем преобразователь устанавливается в юстировочный кронштейн и производится юстировка преобразователя. В результате юстировки согласно схеме, представленной на рисунке 8, в поле зрения оператора наблюдается интерференционная картина в виде прямых полос, а с помощью фотоприемного устройства регистрируется пучок с равномерным распределением интенсивности.

Список литературы:

1. *Котляр В.В., Хонина С.Н.* Выравнивание интенсивности фокального пятна сфокусированного гауссова пучка // Институт систем обработки изображений РАН, 1998, выпуск №18.
2. *Fred M. Dickey, Scott C. Holswade, David L. Shealy.* // Laser Beam Shaping Applications. Boca Raton, CRC Press pbl., 2006, pp.269-272.
3. *Киширин В.И.* Основы формообразования оптических поверхностей. //Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2006, с.134-139.
4. *Keiji Fuse.* Beam shaping for advanced laser materials processing //Laser Technik Journal, 2/2015, pp.19-22
5. *Fabian Duerr, Hugo Thienpont.* Refractive laser beam shaping by means of a functional differential equation based design approach // Optics Express , 2014, Vol. 22, No. 7, 8001-8011.

РАЗВИТИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ВАРКИ ОПТИЧЕСКИХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СТЕКОЛ

ГУЛЮКИН М.Н., ЕЛИСЕЕВ Е.К., ЗОЛИКОВ А.В., ИГНАТОВ А.Н., КРЕХОВА Е.Ю., НИКОНОВ А.Б.,
РЫСЬКОВ В.С., ХРАМОГИН Д.А.

АО «Лыткаринский завод оптического стекла»

ООО«Вектор Пром»

НПК-74

E-mail: m.gulyukin@lzos.ru, ignatov@lzos.ru, sitall-74@lzos.ru, abnikonov@mail.ru, vectorprom@yandex.ru,
khramogin@lzos.ru

Производство оптических и специальных технических стекол, характеризуется высокими требованиями к конечной продукции, широкой номенклатурой, непостоянными объемами производства, сложными технологиями, что вносит определенные трудности в создание надежных систем автоматизированного управления. Однако, несмотря на это, достигнуты определенные успехи в данном направлении, позволяющие сделать процесс варки, отлива, отжига более воспроизводимыми и менее зависящими от человеческого фактора. В работе рассмотрены основные результаты внедрения автоматизированных процессов, проводимых на наиболее значимых для оптического стекловарения печах.

Ключевые слова: построение САУ, цикличность производства варки, операции перемешивания, изменение режима варки, хранение информации варки, программа Мастер SCADA

В последние десятилетия автоматизация стекольного производства достигла значительного развития: создание современных ванн стекловаренных печей немислимо без системы автоматизированного управления (САУ). Автоматизация процесса стабилизирует работу печи, что положительно сказывается на качестве стекла, способствует уменьшению износа огнеупоров, а также рациональному использованию электроэнергии и топлива [1].

Построение САУ во многом определяется спецификой технологии и конструктивными особенностями объекта управления. Для большинства технологических процессов хорошо зарекомендовало себя построение централизованных систем управления с распределенным сбором информации от удаленных устройств.

Наиболее хорошо изученный объект автоматизации - ванная стекловаренная печь непрерывного действия, используемая для производства листового и тарного стекла. Однако даже на таких объектах до настояще-

го времени отсутствует автоматический контроль ряда параметров и ведутся работы по повышению эффективности автоматического контроля работы печи в целом.

Это объясняется тем, что в стекловаренной печи протекают сложные физико-химические процессы, зависящие от многих параметров. Наличие многообразных спонтанных отклонений от этих параметров осложняет автоматизацию контроля над процессом в целом. Ситуация еще более осложняется в случае автоматизации процессов производства оптического и специального технического стекла.

Производство таких стекол отличается разнообразной номенклатурой и относительно небольшими и часто меняющимися объемами. Для сведения, АО ЛЗОС производит в настоящее время около 150 марок бесцветного, 60-ти марок цветного и около 50-ти видов специальных технических стекол. Объемы производства тех или иных марок стекол разнятся от сотен килограммов до нескольких сотен тонн в год. К этому необ-

ходимо добавить повышенные требования к контролируемым параметрам оптического стекла, количество которых в зависимости от области применения может достигать 10-15 параметров. Естественно, что данные факторы приводят к усложнению технологии производства и усложняют автоматизированный контроль над процессом в целом.

Для варки используются как электрические установки для варки в сосудах объемом 50 л, так и ваннные печи периодического действия объемом до 20 тонн.

Отличительной особенностью большинства стекловаренных агрегатов оптического стекловарения является цикличность производства: процесс варки не является непрерывным, как в случае производства листового и тарного стекла. За один цикл на установке последовательно осуществляются операции варки: засыпка стеклобоя, разогрев тигля, засыпка сырьевой смеси, с последующим ее разваром и осветлением, перемешивание, студка и отлив стекломассы в форму. После отлива стекломассы цикл повторяется вновь.

Другая особенность процессов оптического стекловарения наличие операции перемешивания. Именно благодаря ей удается получить высокооднородное стекло. В определенный момент, установленный технологическим режимом, мешалка заводится в стекломассу. Перемешивание осуществляется определенное время при переменном числе оборотов мешалки.

Кроме того, в процессе варки возможны незапланированные изменения заданного режима, которые обусловлены спонтанным обильным выделением газов из сырьевой смеси, что требует ручного подбора мощности нагрева или расхода газа. Также, в процессе варки отбирается проба на определение показателя преломления и в случае ее недопустимого отклонения от номинального значения проводится операция корректировки состава. Это значит, что как минимум временные параметры режима изменяются.

Вышеуказанные обстоятельства существенно усложняют автоматизированное

управление процесса в целом. В то же время, автоматизация процесса позволила бы стабилизировать процесс и обеспечить воспроизводимость результатов от варки к варке.

До недавнего времени автоматизация таких объектов считалась нецелесообразной и невыполнимой задачей, многое зависело от профессионализма стекловара. Однако возросшие требования к качеству стекла, и уровень развития автоматики обусловили начало работ в этом направлении.

Несмотря на специфичность производства оптического стекла, прогресс в данном направлении, достигнутый за последние десять лет очевиден. Рассмотрим подробнее внедрение САУ для наиболее значимых в оптическом стекловарении стекловаренных агрегатов.

Наиболее традиционным стекловаренным агрегатом, для варки оптических стекол являются горшковые газовые печи периодического действия, позволяющие производить качественную стекломассу разнообразных марок. В основе работы таких печей заложено использование тепла отходящих газов с помощью регенераторов. Подробнее работа печей такого типа описана в [2-3].

В ходе проведения работ по созданию САУ горшковой газовой регенеративной печи периодического действия было установлено контрольное и управляющее оборудование: современные системы контроля температуры в камере печи, в регенераторах и дымоудаляющих каналах, датчики давления и разрежения марки «Метран» и «АИР», частотные преобразователи Altivar 61 и Altivar 71 для управления процессом размешивания стекломассы, газоанализаторы по кислороду марки «ЭКОН». Вся информация обрабатывается с помощью контроллера TSX «Premium» производства «SchneiderElectric» и выводится на графическую панель оператора и монитор персонального компьютера (см. рис. 2), а также заносится в архив. Проведение подобных работ потребовало внесения некоторых изменений в конструкцию печи.

Если до внедрения САУ контроль осуществ-

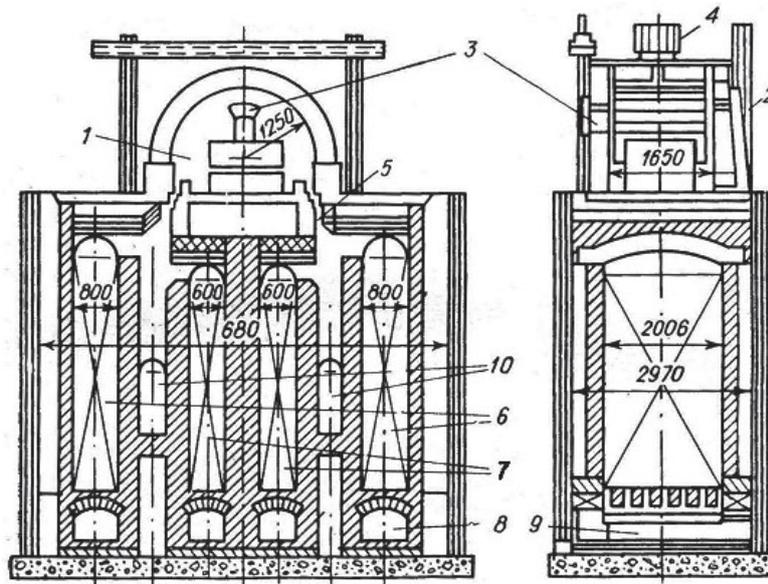


Рисунок 1.

Схема регенеративной печи для варки оптического стекла:

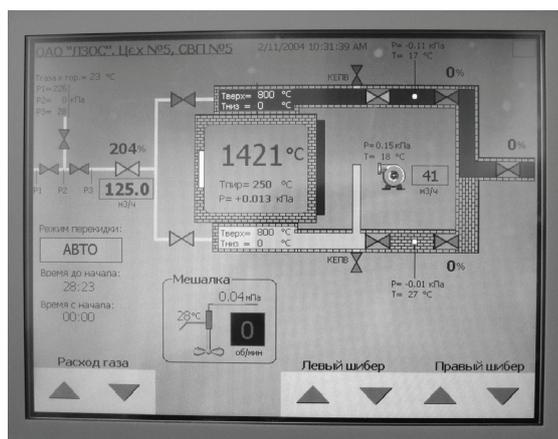
1 – рабочая камера; 2 – заслонка; 3 – засыпное окно; 4 – отверстие для штанги стекломешальной машины; 5 – горелки; 6 и 7 – регенераторы; 8 – поднасадочные каналы; 9 – дымоход; 10 – карманы-колодцы

влялся вручную по таким параметрам как температура в камере печи, расход газа, положение поворотных и отсечного шибберов, температура воды на охлаждение мешалки, а автоматически осуществлялся только перевод направления пламени, то на данный момент САУ позволяет контролировать до 42-х параметров технологического процесса. Основные из них:

- температура газовой среды на уровне кромки сосуда, поверхности стекломассы в стекловаренном сосуде, отходящих газов, температура для выводки печи, воды на выходе после мешалки, воздуха к горелкам, газа к горелкам;
- давление газа до ГРУ, давление газа к печи, контроль герметичности клапанов, разряжение перед правым и левым регулиру-



а)



б)

Рисунок 2.

а) внешний вид шкафа управления

б) панель оператора САУ горшковой газовой регенеративной печи периодического действия

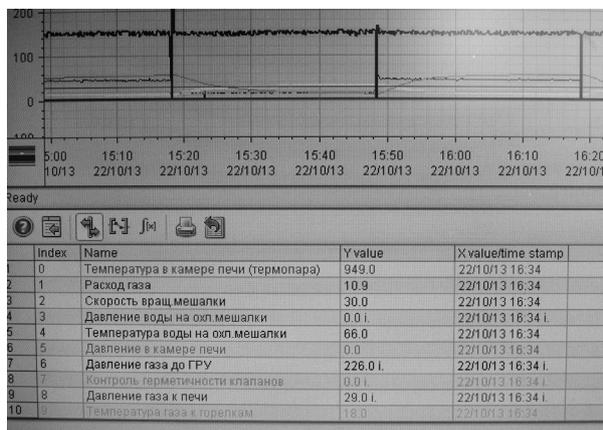


Рисунок 3.

Внешний вид окна программы автоматизированного управления технологическим процессом варки оптического стекла

ющими шиберами, степень открытия регулирующей заслонки газа, расход газа, расход воздуха, частота вращения воздухоудвки, содержание кислорода в отходящих дымовых газах;

- степень открытия правого и левого поворотных шиберов, положение перекидного устройства для воздуха, положение правого и левого перекидных шиберов, положение левого и правого газовых перекидных клапанов, положение клапана безопасности, положение блока отсечных газовых клапанов, положение левого клапана естественного подсоса воздуха, положение правого клапана естественного подсоса воздуха;

- скорость вращения мешалки, положение мешалки.

Управление технологическими процессами возможно как с персонального компьютера

(ПК) оператора, так и с графической панели шкафа управления (см рис. 3). Информация обо всех технологических параметрах передается на ПК и хранится в виде архива в течение заданного времени. ПК всех печей соединены в одну локальную сеть и вся информация в режиме реального времени передается на общий сервер – автоматизированное рабочее место инженера-технолога.

Для отработки процессов с использованием САУ была проведена серия варок оптического стекла наиболее востребованной марки, результаты исследования свойств стекла, полученного в ходе этих варок приведены в табл. 1.

Как видно из полученных данных, характеристики стекла помимо высоких параметров отличаются стабильностью, что было недостижимо при ручном управлении.

Второй по значимости объект автоматизации – электрическая установка периодического действия для варки в тиглях объемом 50-60 л с индукционным нагревом. Нагрев тигля и сливного патрубка нагрев патрубка осуществляется двумя отдельными индукторами (большим и малым), которые включаются и выключаются в зависимости от стадии цикла.

Помимо вышеуказанных особенностей процессов оптического стекловарения перед началом варки данной установке осуществляется выводка футеровки тигля. Эта операция требует специального режима работы индукционного нагревателя, который реализуется по широтно-импульсному способу управления мощностью.

Таблица 1.

Результаты исследования свойств оптического стекла после внедрения САУ

№ варки	n _e		n _{F-C'}		μ _A	бессвильность, пузырность	
	катег.	класс	катег.	класс		катег.	класс
1	2	A	2	A	2	2	Б
2	2	A	3	A	3	2	A
3	3	A	3	Б	3	2	Б
4	1	A	2	Б	2	2	Б

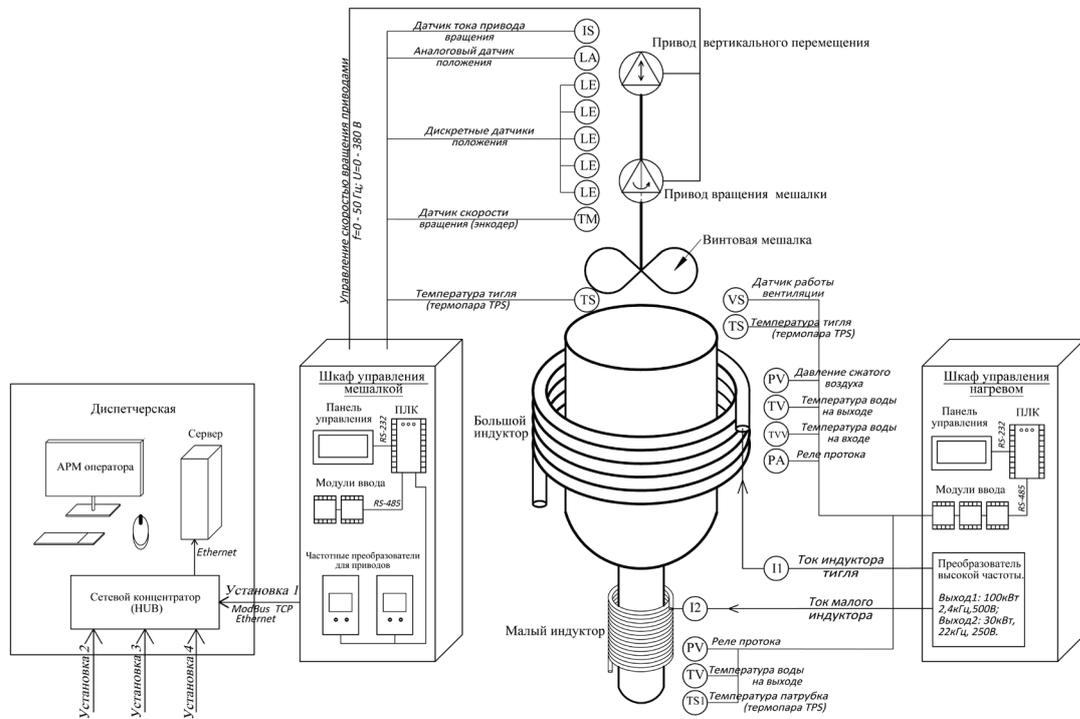


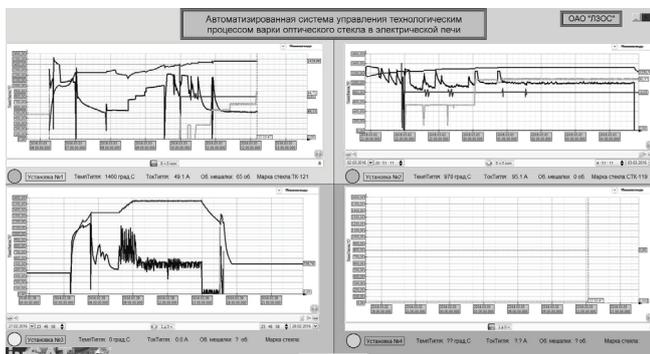
Рисунок 4.

Схема созданной САУ на электрической установке варки стекла в тигле

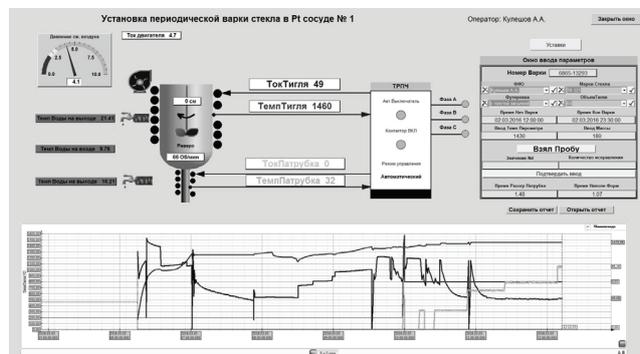
Для решения вопроса автоматизации процесса с использованием электрической стекловаренной установки выбран путь создания отдельных подпрограмм, автоматизирующих работу оборудования на отдельных этапах технологического процесса. Такими подпрограммами являются: программа перемешивания – изменение высоты мешалки по высоте тигля, программа управления скоростью вращения мешалки по времени, программа управления скоростью вращения мешалки в зависимости от температуры сте-

кломассы, программа вывода футеровки тигля, управление нагревом по температуре по току индуктора, программа нагрева патрубка при выработке. Включение и переход с программы на программу производит стекловар с панелей управления по мере необходимости. Общая схема созданной САУ представлена на рис. 4.

Основные параметры варки передаются на автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора, расположенное недалеко от стекловаренных установок (см. рис. 5).



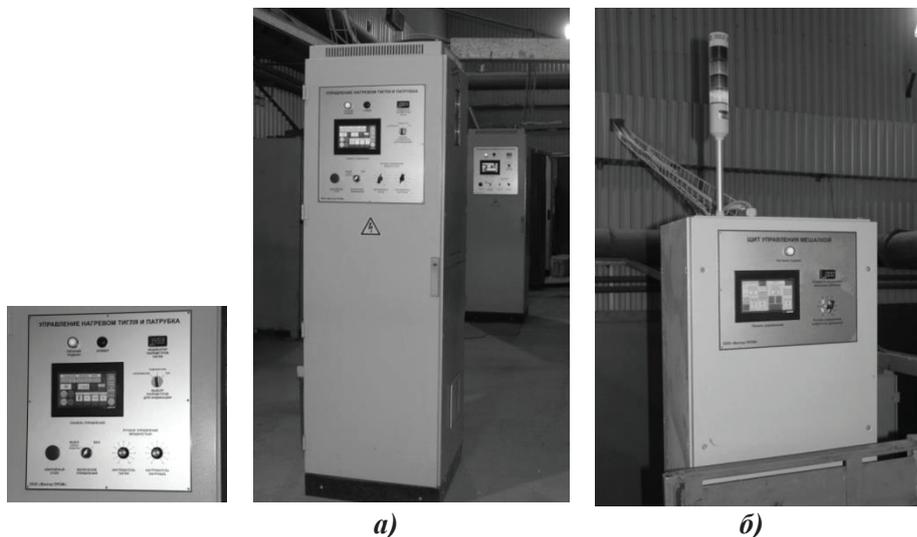
а)



б)

Рисунок 5.

Внешний вид панели управления АРМ для одновременного наблюдения а) за несколькими процессами и б) за одним процессом



а)

б)

Рисунок 6.

**Внешний вид сенсорных панелей управления
а) нагревом тигля и патрубков и б) работой мешалки**

Программа Мастер SCADA позволяет обслуживать одновременно четыре одинаковые установки, на рис. 5а представлен внешний вид экрана персонального компьютера (ПК) для варианта одновременного наблюдения за всеми процессами.

При необходимости, оператор имеет возможность давать задание на варку с рабочего места оператора. Однако, практически оказалось удобно осуществлять управление с сенсорных панелей управления мешалками и

нагревом, расположенных непосредственно на установках (см. рис. 6). Запись параметров варки ведется в отдельные файлы, которые впоследствии оформляются как приложение к маршрутной карте, являясь неотъемлемой ее частью (см. рис. 7). Оператор в ручном режиме вносит в маршрутную карту такие параметры варки как фамилия оператора, марка стекла, количество и время добавок при исправлении и т.д.

Таким образом, имея данные объективного

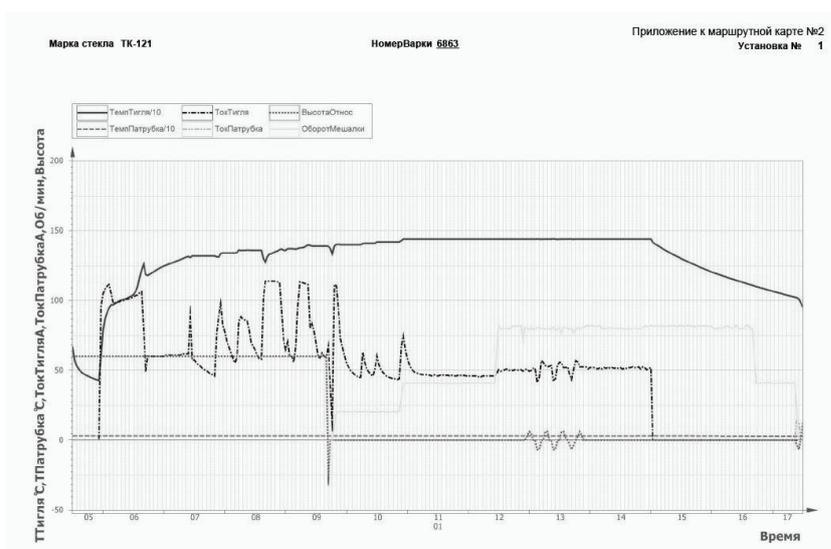


Рисунок 7.

Внешний вид приложения «Маршрутная карта»

Таблица 2.
Сравнение параметров качества стекла,
получаемого использования САУ и с ручным управлением

Тип процесса	Параметр	
	Пузырность, шт/кг	Бессвильность, %
без САУ	100-150	10-30
с использованием САУ		
Варка 1	24,0	30
Варка 2	2,0	50
Варка 3	16,9	60

контроля, совмещенные с качеством стекла, легко проводить анализ и корректировку технологического процесса.

Отдельно необходимо отметить силовую часть вновь созданной САУ. Для управления мощностью нагревателей тигля и патрубка используются преобразователи типа ТРПЧ-100-2,4/30-22-ПЛК, характеризующиеся выходной мощностью 100,30 кВт и частотой 2,4 и 22 кГц.

Особенности преобразователя частоты данного типа в отличии остальных, выпускаемых у нас в стране источников, заключаются в следующем:

- преобразователь частоты имеет два выхода – для подключения индукционного нагревателя тигля и нагревателя патрубка. Нагреватели могут работать одновременно, а мощности в них регулируются независимо;

- преобразователь использует попеременно два способа управления мощностью в нагревателях: частотный и широтно-импульсный, что позволяет регулировать мощность во всем диапазоне начиная с нуля. Данное обстоятельство обеспечивает качественную выводку футеровки печи;

- преобразователь использует воздушно принудительный способ охлаждения силовых элементов в отличие от других подобных устройств, которые в обязательном порядке имеют водяное охлаждение и связанные с водой проблемы при их эксплуатации;

- в источнике для построения схемы управления используется ПЛК. Это значительно

упрощает конструкцию преобразователя и повышает его надежность;

- для согласования источника с нагревателями используется высокочастотные трансформаторы, которые осуществляют гальваническую развязку с сетью.

Это обеспечивает безопасность работы стекловаров и надежную работу термопар.

Вновь созданную систему автоматизированного управления процессом применили при варке оптического стекла одного из проблемных составов. Конечные блоки стекла данного состава, как правило, сильно засвилены и содержат большое количество пузырей. После первого применения программного управления процессом получены положительные результаты (см. табл. 2).

Таким образом, использование системы автоматического управления, значительно расширяет возможности не только для создания новых режимов проведения процессов, но и для совершенствования уже существующих.

Список литературы:

1. Сборник статей сайта выставки «Мир Стекла» <http://www.mirstekla-expo.ru/ru/article-about-glass/avtomatizaciya-steklovarennoy-pechi> (дата обращения: 10.05.2016).
2. Демкина Л.И. Физико-химические основы производства оптического стекла – Л.: Химиздат, 1976. – 456 с.
3. Павлушкин Н.М. Химическая технология стекла и ситаллов – Москва: Стройиздат, 1983. – 432 с.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ АНАЛИЗА СОСТАВА ЖИДКИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

АЛЕХНОВИЧ В.И., МЕЛЬНИКОВ Д.М., ЯКИМОВА М.А.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: vial@bmsu.ru, Daenoor@gmail.com, marya.korotaeva@yandex.ru

Предложен метод контроля параметров фазовых переходов технологических сред лазерным излучением. Этот метод отличается универсальностью с точки зрения оптической прозрачности образцов благодаря исследованию излучения отраженного от их поверхности, а не проходящего сквозь слой. На основе проведенных исследований предложен метод экспресс-анализа технологических сред и автоматизированный лазерный комплекс для его осуществления.

Ключевые слова: рассеяние излучения, коллоидные растворы, нефтепродукты, охлаждение.

Контроль физических и химических параметров коллоидных растворов крайне важен в современном мире. Нефтепродукты, лекарственные препараты, продукты питания могут служить примерами таких растворов.

Как правило, методы анализа предусмотренные стандартами, являются химическими или физико-химическими. Они требуют высокочистых химических реактивов, квалифицированного персонала. Проведение измерений занимает, как правило, длительное время. Точность снижается из-за загрязнения реактивов, ошибок лаборанта, субъективности оценки [1].

Более перспективными являются инструментальные методы анализа: оптические, ультразвуковые, кондуктометрические, криоскопические пр. Препятствием для повсеместного применения этих методов является то, что они являются косвенными, кроме того на величину выходного сигнала влияет не один параметр образца и большое число внешних факторов, что делает интерпретацию результатов затруднительной и увеличивает погрешность измерений. Особенно это касается портативных приборов [2].

В частности, лазерные анализаторы, как правило, используют в качестве полезного сигнала показатель поглощения или рассеяния излучения, на которые влияют не только химический, но и дисперсный состав исследуемых веществ. Большое количество неизвестных в уравнении приводит к невозможности точно установить связь между оптическими и физическими параметрами. Для повышения достоверности результатов экспериментов необходимо увеличить количество информации, получаемой о пробе в ходе эксперимента. Одним из предлагаемых решений является использование комбинированного метода анализа, основанного на анализе изменения оптических свойств вещества при его охлаждении. Метод основан на анализе изменения оптических свойств исследуемого вещества в процессе его охлаждения. Фазовые превращения, происходящие при этом, различны для разных компонентов вещества, что позволяет путем выбора подходящего режима охлаждения регистрировать необходимый исследователю параметр.

Регистрация изменений в структуре об-

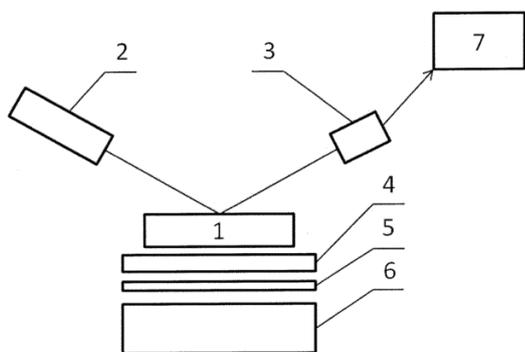


Рисунок 1.
Структурная схема анализатора

разца с помощью лазерных методов анализа позволяет добиться высокой селективности и точности измерений [3].

Результаты будут тем лучше, чем более точно изучены физические процессы, происходящие в пробе при понижении температуры. В случае нефтепродуктов и сходных с ними веществ, выделяют два процесса, за счет которых происходит затвердевание: кристаллизацию и стеклование.

Основными компонентами, отвечающим за рост кристаллов, являются парафины. При разных режимах охлаждения материала кристаллы могут расти по-разному. Вместе с тем вязкость материала увеличивается за счет того, что нерастворенные в материале частицы способны образовывать надмолекулярные образования – мицеллы. Полидисперсные мицеллы постепенно повышают вязкость системы, не образуя при этом кристаллов [4].

В зависимости от состава среды степень влияния этих процессов может меняться. Изменение состава всегда ведет к изменению механизма застывания материала. Из этого следует, что фиксация характера взаимодействия лазерного излучения с поверхностью вещества, претерпевающего фазовые превращения при застывании, может служить инструментом определения его технологических параметров. При этом изменением спектрального состава излучения можно добиться получения информации о росте кристаллов или мицелл (при использовании длинноволнового или коротковол-

нового излучения), а выбором рабочего диапазона температур – исследования необходимого компонента.

Для реализации этого метода был создан прибор, схема которого показана на рис. 1. Анализатор состоит из лазера, снабженного коллимирующей системой 2, кювета для исследуемого вещества 1 и приемника излучения 3, отраженного от исследуемого вещества. Кювета установлена на элементе Пельтье 6 с закрепленной на нем при помощи термопасты 5 теплопроводящей пластиной 4. Управление работой лазера, элемента Пельтье, сбор и обработка информации обеспечивается компьютером. Внешний вид анализатора приведен на рис. 2.

На рис. 3 приведена зависимость изменения отраженного сигнала от снижения температуры для летнего дизельного топлива, полученная по разработанному методу.

Анализ результатов исследований, представленных на рисунке 3, позволил описать механизм застывания жидких нефтесодержащих технологических сред. На начальном этапе при температурах до $-6,7^{\circ}\text{C}$ заметной потери текучести не наблюдается, т.е. процесс кристаллизации еще не начался. Далее, при температуре $-12,3^{\circ}\text{C}$ происходит активный рост кристаллов парафинов, помутнение материала, снижается подвижность материала, увеличивается вязкость.

Данный этап можно охарактеризовать как смешанный — кристаллизации и стеклования. Начиная от температуры $-12,3^{\circ}\text{C}$



Рисунок 2.
Внешний вид анализатора

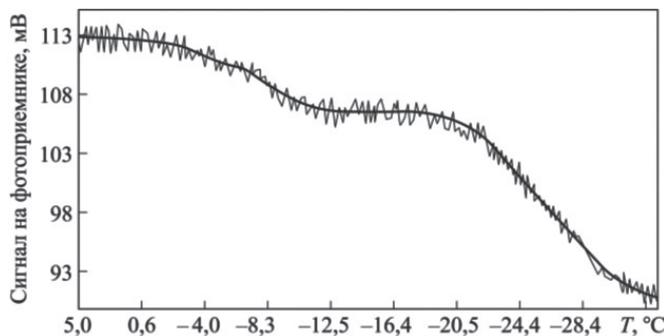


Рисунок 3.

Зависимость изменения отраженного сигнала от снижения температуры для летнего дизельного топлива

доминирующую роль в процессе застывания топлива уже играют кристаллы парафинов. Парафины кристаллизуются в широком диапазоне температур и этот процесс преимущественно линейный. В течение времени снижения температуры до -16°C кристаллы парафинов полностью кристаллизуются,

оптическая плотность падает, образец светлеет для используемого оптического излучения. В этот момент можно говорить о полном застывании образца [4].

Список литературы:

1. Горбатова К.К. Химия и физика молока – М.: ГИОРД, 2004.
2. Григорьянц А.Г., Кортаева М.А., Алехнович В.И., Шиганов И.Н. Инструментальные методы контроля состава и свойств полидисперсных сред Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 6 (№ 2, 2012).
3. Мельников Д.М., Шиганов И.Н. Определение низкотемпературных свойств дизельных топлив путём экспресс-анализа жидких нефтепродуктов, Технология Машиностроения, 2011, №11, С. 65-67.
4. Шиганов И.Н., Мельников Д.М. Исследование технологических сред методом лазерного фазового анализа, Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. “Машиностроение”, 2015, №4, с 100-108.

СПОСОБ НАНЕСЕНИЯ ПРОСВЕТЛЯЮЩЕГО МНОГОСЛОЙНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА

ДЬЯКОВА И.И.

АО «Швабе - Приборы», г. Новосибирск

E-mail: post@tochpribor.com

В статье рассмотрена технология нанесения на стеклянной подложке просветляющего многослойного широкополосного покрытия, описана конструкция просветляющего покрытия с неравнотолщинными слоями на стёклах с показателем преломления 1,51-1,81, приводятся спектральные кривые коэффициента отражения в видимой области спектра.

Ключевые слова: многослойное широкополосное покрытие, плёнообразующие материалы, коэффициент отражения.

В последнее время всё более актуальным становится требование высокого значения коэффициента пропускания оптических систем при работе в дневных и сумеречных условиях.

Данное требование приводит к необходимости проектирования и изготовления оптических деталей имеющих низкий коэффициент отражения в видимом спектральном диапазоне.

Функционирование большинства современных оптических систем невозможно без использования тонкоплёночных интерференционных покрытий. Создание конструкции (синтез) оптического покрытия, обладающего желаемой спектральной зависимостью энергетического коэффициента отражения, является основной задачей современной оптики тонких плёнок.

В оптических системах с большим числом оптических элементов наблюдается значительное снижение светопропускания системы за счёт потерь на отражение от преломляющих поверхностей.

Отражение от преломляющих поверхностей возрастает с увеличением показателя преломления стекла. Одним из способов снижения отражения от оптических элементов и

увеличения светопропускания оптических систем является нанесение просветляющего покрытия. Используются одно-, двух- или многослойные просветляющие покрытия, получаемые испарением в вакууме или нанесением из растворов легкогидролизующихся соединений.

Просветляющее покрытие наносят на оптические детали, имеющие плоскую или сферическую рабочую поверхность [1].

Для создания оптического покрытия с желаемыми спектральными характеристиками требуется решить задачу синтеза конструкции многослойной плёночной системы, которая в соответствии с выбранной моделью заключается в следующем:

- выбрать материалы, образующие тонкие пленки;
- задать показатели преломления для выбранных материалов;
- задать показатели преломления сред, обрамляющих многослойную систему (стекло – воздух или стекло – стекло);
- подобрать необходимое количество слоев толщин из выбранных материалов, а также последовательность их чередования.

Соответствие параметров покрытия требуемым спектральным характеристикам не мо-

жет считаться конечной целью. К дополнительным требованиям следует, прежде всего, отнести практическую реализуемость покрытия в условиях производства.

Высокое качество покрытия не может быть достигнуто без знания с высокой точностью оптических параметров каждого слоя.

Серьёзным ограничением при увеличении количества напылённых слоев является фактор накопленных ошибок в толщинах слоев. Эти ошибки могут быть вызваны нестабильностью самого процесса напыления, зависящего как от возможностей установки, так и от формы поверхности подложки. Кроме того, показатели преломления веществ могут случайным образом меняться из-за наличия примесей или морфологических изменений в процессе испарения напыляемых материалов. В этих случаях тем более необходим послойный контроль и возможность влиять на параметры слоя в процессе напыления [2].

Решением задачи синтеза конструкции многослойной плёночной системы является создание способа нанесения просветляющего многослойного широкополосного покрытия на поверхность оптического стекла, с получением следующих технических результатов:

1. Снижение коэффициента отражения от поверхности оптического стекла, позволяющего увеличить светопропускание в оптических приборах, а также обеспечение стабильности получения низкого коэффициента отражения.

2. Унификация способа для различных марок стекла путём использования просветляющего покрытия, состоящего из одного набора плёнообразующих материалов со слоями разной толщины.

Способ реализуется с помощью установки для нанесения просветляющего многослойного покрытия, содержащей вакуумную камеру с устройством для регулирования величины вакуума, размещённые в камере электронно-лучевые испарители с устройством для регулирования величины тока.

Поставленная задача с достижением указанных технических результатов решается следующим образом.

Способ нанесения просветляющего многослойного широкополосного покрытия на поверхность оптического стекла включает следующие операции: расчёт толщины слоёв просветляющего покрытия по табличным значениям показателей преломления для получения требуемого коэффициента отражения покрытия в заданном спектральном диапазоне, термообработку стеклянной подложки в вакуумной установке, нанесение плёнообразующих материалов в вакуумной установке путём электронно-лучевого испарения материала в вакууме и послойного осаждения паров на поверхности стекла в процессе его многократного прохождения через зону напыления, причём, слои выполняют из чередующихся материалов со средним и высоким показателем преломления, а внешний слой - из материала с самым низким из них показателем преломления.

- перед нанесением покрытия проводят чистку подложки органическими растворителями, очистку тлеющим разрядом в вакуумной установке, а также проводят прокаливание и обезгаживание в вакуумной установке плёнообразующих материалов;

- просветляющее покрытие наносят неравнотолщинными слоями плёнообразующих материалов.

В качестве плёнообразующих материалов могут быть использованы различные материалы, например, оксид титана, триоксид алюминия, оксид гафния, пятиоксид тантала.

В частном случае реализации просветляющее покрытие наносят в семь неравнотолщинных слоёв плёнообразующих материалов, причём, в слоях с первого по шестой используют чередующиеся соответственно диоксид кремния и диоксид циркония, а в седьмом – фторид магния.

Расчёт толщины слоёв по табличным значениям показателей преломления проводят в соответствии с техническими требованиями к коэффициенту отражения всего покрытия для определённой марки стекла в заданном спектральном диапазоне.

Контроль оптических спектров пропуска-

ния или отражения в реальном масштабе времени осуществляет акустооптический спектрофотометр, управляемый внешней ЭВМ (персональным компьютером). В ЭВМ введена программа расчёта конструкции просветляющего покрытия с визуальным изображением на экране монитора ЭВМ расчётных спектральных характеристик слоёв покрытия, сопоставления измеренной зависимости показателя преломления от длины волны с заданной и выдачи сигналов для корректировки режимов напыления: силы тока в нагревателях катода электронно-лучевых испарителей, и/или скорости перемещения оптического элемента в зоне напыления, и/или величины вакуума для уменьшения несоответствий измеренной и заданной зависимости показателя преломления от длины волны.

При наличии примесей в плёнкообразующих материалах получаемая зависимость показателя преломления от длины волны будет иметь отклонения от расчётной зависимости.

Определение показателя преломления и полученной зависимости показателя преломления от длины волны на каждом напыляемом слое в процессе нанесения покрытия с использованием акустооптического спектрофотометра AOS 3S позволяет осуществлять подачу корректирующих сигналов, управляющих процессом напыления для уменьшения несоответствий полученных параметров с расчётными. Реализуемая в способе возможность напыления слоёв разной толщины даёт возможность использовать один и тот же набор из трёх плёнкообразующих материалов для деталей из разных марок стекла.

Описываемый способ реализован на установке вакуумного напыления ВУ-1А, оснащённой акустооптическим спектрофотометром и подключённой к его выходу персональной ЭВМ; выходы ЭВМ подключены к устройствам для регулирования режимов напыления: регулирования тока электронно-лучевых испарителей, и/или величины вакуума, и/или скорости вращения привода для передачи соответствующих корректирующих сигналов.

На подложку наносили семислойное по-

крытие диоксида циркония ZrO_2 , диоксида кремния SiO_2 и фторида магния MgF_2 . Конструкцию просветляющего покрытия ввели в систему контроля процесса напыления (ЭВМ и спектрофотометр AOS 3S) и рассчитали для стёкол с различными показателем преломления $n = (1,51 - 1,81)$ по ГОСТ 3514-94.

Пример 1. Нанесение просветляющего многослойного широкополосного покрытия на подложку из стекла К8 с показателем преломления $n = 1,518$.

Задаются показатели преломления для выбранных плёнкообразующих материалов: для диоксида кремния $n = 1,45$; для диоксида циркония $n = 1,92$, для фторида магния $n = 1,38$, и показатель преломления стекла $n = 1,518$.

Определяются толщины слоёв по табличным значениям показателей преломления в соответствии с техническими требованиями к коэффициенту отражения всего покрытия для марки стекла К8 в видимом спектральном диапазоне.

На ЭВМ подбирается необходимое количество слоёв из выбранных материалов и их толщин, а также последовательность их чередования для получения соответствия расчётной зависимости коэффициента отражения от длины волны в видимом диапазоне спектра.

В ЭВМ вводится конструкция покрытия в кодах программы $M(HL)^*kG$,

где: H – слой с высоким показателем преломления,

L – слой со средним показателем преломления,

M – слой с низким показателем преломления,

G – подложка,

k – количество слоёв.

При нанесении слоя наблюдают на экране монитора ЭВМ визуальное изображение расчётных спектральных характеристик, показывающих динамику напыления первого слоя, и, при необходимости, производят корректировку параметров слоя регулируемой режимов напыления для уменьшения несоответствий измеренной и заданной зависимостей показателя преломления от длины волны. Контроль за процессом осуществля-

Таблица 1.

Конструкция многослойного широкополосного просветляющего покрытия

№ слоя	Напыляемый материал	Показатель преломления	Оптическая толщина слоя, нм на стекле К8		Оптическая толщина слоя, нм на стекле ТФ10	
			$0,797\lambda$		$0,364\lambda$	
1	SiO ₂	1,45	$0,797\lambda$	67,29	$0,364\lambda$	30,73
2	ZrO ₂	1,92	$0,140\lambda$	8,92	$0,395\lambda$	25,16
3	SiO ₂	1,45	$0,638\lambda$	52,52	$0,479\lambda$	39,43
4	ZrO ₂	1,92	$0,685\lambda$	42,73	$0,836\lambda$	52, 14
5	SiO ₂	1,45	$0,119\lambda$	10,05	$0,109\lambda$	9,20
6	ZrO ₂	1,92	$0,937\lambda$	57,56	$0,906\lambda$	55,66
7	MgF ₂	1,38	$0,935\lambda$	83,00	$0,948\lambda$	84,15

ется акустооптическим спектрофотометром измерением коэффициента отражения при высокоскоростном сканировании в заданном спектральном диапазоне.

При совпадении полученной кривой зависимости показателя преломления от длины волны первого слоя с теоретической испаритель 1-го слоя выключается, его заслонка закрывается.

Для нанесения последующих слоёв просветляющего покрытия повторяют все вышеуказанные действия. Слои разной толщины наносятся в следующей последовательности согласно данным, указанным в табл. 1.

После нанесения всех слоёв при совпадении на экране ЭВМ практически полученной кривой 2 с рассчитанной кривой 1 (рис. 1 график зависимости коэффициента отражения света (R) от длины волны для покрытия, нанесённого на линзу из оптического стекла К8) процесс испарения прекращается, и блок управления испарителем вакуумной камеры отключается. В процессе напыления получен суммарный коэффициент отражения не более 0,15%.

Пример 2. Нанесение просветляющего многослойного широкополосного покрытия на стеклянную подложку из стекла ТФ10 с показателем преломления $n = 1,81$.

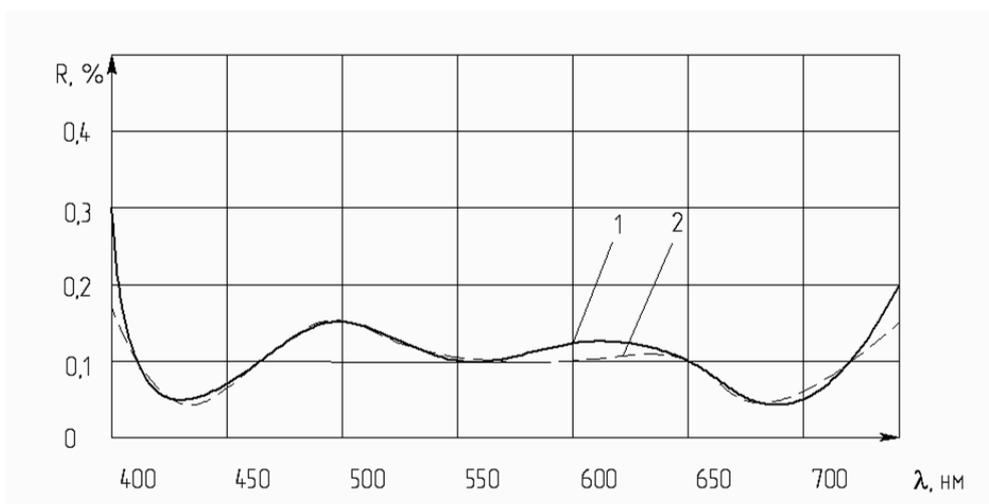


Рисунок 1.

График зависимости коэффициента отражения света (R) от длины волны для покрытия, нанесенного на линзу из оптического стекла К8

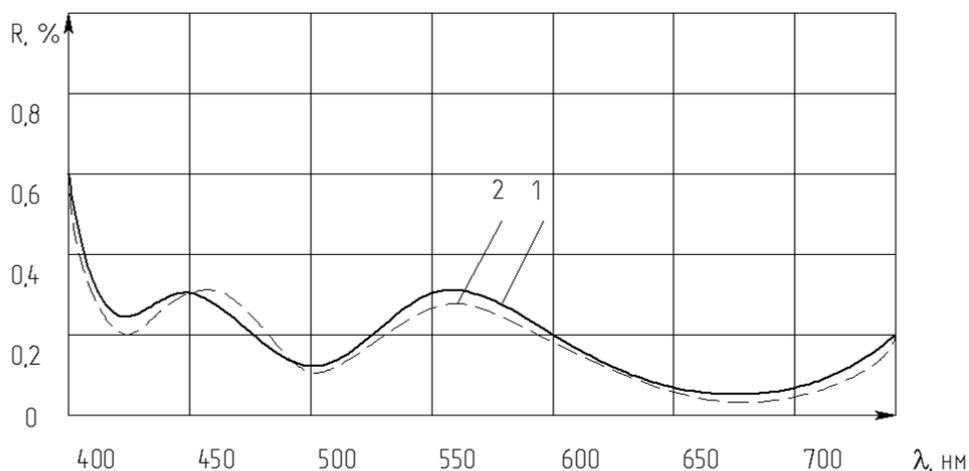


Рисунок 2.

График зависимости коэффициента отражения света (R) от длины волны для покрытия, нанесённого на линзу из оптического стекла ТФ10

Последовательность технологических операций при нанесении просветляющего покрытия такая же, как в примере 1. Для подложки с показателем преломления 1,81 рассчитывают значения толщин напыляемых слоёв, производят напыление чередующихся неравнотолщинных слоёв диоксида кремния и диоксида циркония и внешний слой фторида магния, см. табл.1.

На рис. 2 приведён график зависимости коэффициента отражения света (R) от длины волны для покрытия, нанесённого на линзу из оптического стекла ТФ10, где: 1 - рассчитанная кривая, 2 - практически полученная кривая. В результате напыления покрытия на стеклянную подложку из стекла ТФ10 получен суммарный коэффициент отражения от поверхности подложки не более 0,25%.

Приведённый способ нанесения многослойного широкополосного просветляющего покрытия позволяет получить суммарный ко-

эффициент отражения в диапазоне длин волн видимой области спектра для поверхности на подложках из стёкол с показателем преломления $n=1,51$ не более 0,15 %, для подложек из стёкол с показателем преломления $n=1,81$ не более 0,25%. Указанным способом произведено нанесение просветляющего покрытия на несколько десятков подложек из стекла с различными показателями преломления и во всех случаях стабильно получены указанные низкие коэффициенты отражения.

Список литературы:

1. Яковлев П.П., Мешков Б.Б. Проектирование интерференционных покрытий. Москва, Машиностроение. 1987 г., стр.135-151
2. Гонопольский А.М. Способ нанесения просветляющего многослойного покрытия на поверхность оптического элемента и установка для осуществления способа // Патент России № 2133049.1999.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАНКОВ НЕПРЕРЫВНОЙ ПОЛИРОВКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

АБДУЛКАДЫРОВ М.А., БЕЛОУСОВ С.П., ЗАЛОМЛЕНКОВ А.И., ИГНАТОВ А.Н., ПАТРИКЕЕВ А.П., ПАТРИКЕЕВ В.Е., СУДАРИКОВ И.Н., ШАРОВ Ю.А.

АО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: lastro@lzos.ru

При изготовлении деталей с плоскими рабочими поверхностями, имеющими форму образующей отличную от круга, а так же имеющих отношение диаметра к толщине более 8, возникают существенные трудности в применении станков классической полировки.

Альтернативой для предотвращения проблем при формообразовании вышеуказанных деталей являются станки непрерывного полирования.

При обработке на станках такого типа деталь обрабатывается рабочей поверхностью вниз, в связи с чем удельное давление при обработке оказывается равномерно распределенным (одинаковым) и исчезают проблемы краевого эффекта и деформации.

Ключевые слова: станок FLP-2.2, станок FLP-4000, FLP-1200, температурные параметры, манипуляторы, зеркала, сложные корпусные детали, возможности одновременной обработки многих деталей.

В рамках выполнения работ по изготовлению оптических элементов для сверхмощного лазера требовалось изготовление крупногабаритных плоскопараллельных прямоугольных пластин из специального стекла с точность поверхностей менее 300 нм.

Требования к высокой точности изготовления формы плоских рабочих поверхностей крупногабаритных оптических пластин с некруглым внешним периметром, большое соотношение габаритных размеров к толщине – более 20, большое количество и ограничения по времени изготовления потребовали применения инновационного и высокопроизводительного оборудования.

Для выполнения поставленной задачи было принято решение о разработке технологии с использованием станков непрерывного полирования, для чего в АО ЛЗОС был введен в эксплуатацию станок FLP-2.2 (рис. 1, 2).

Станок оснащен гранитным рабочим столом диаметром 2200 мм, предназначенным для создания полировального инструмента, двумя станциями обработки, план-мастером

диаметром 900 мм, моечной станцией, системой подачи полирующей суспензии, фрезерной системой и системой числового программного управления.

Данный станок позволяет обрабатывать детали с диаметром описанной окружности до 730 мм.

После ввода в эксплуатацию на станке FLP-2.2 была проведена отработка технологии формообразования деталей прямоугольной формы с плоскими рабочими поверхностями, имеющих габаритные размеры 400×200×40 мм. Также были успешно изготовлены другие типоразмеры деталей – габаритами 600×400×80 мм, 500×400×60 мм, 600×300×40 мм из специального оптического стекла, стеклокристаллического материала Астроситалл и плавленного кварца.

Использование станка непрерывного полирования позволило существенно снизить искажение формы рабочей поверхности на краях и, особенно, в углах обрабатываемых деталей. Форма рабочей поверхности, обрабатываемой детали, имеет гладкую структуру.



Рисунок 1.
Общий вид станка FLP-2.2

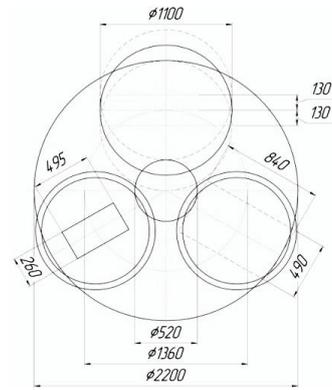


Рисунок 2.
Схема расположения элементов станка FLP-2.2

Применение данного станка позволило получить детали с отступлением от плоскостности менее 300 нм (рис. 3).

В ходе выполнения следующих заказов, а именно плоскопараллельных пластин прямоугольной формы с габаритами 800×450×40 мм возникла необходимость расширения парка станков непрерывного полирования. По заданию АО ЛЗОС фирмой FLP Microprecision Германия был разработан, из-

готовлен и поставлен станок непрерывного полирования FLP-4000 (рис. 4, 5).

Станок оснащен гранитным рабочим столом диаметром 4000 мм, предназначенным для создания полировального инструмента, тремя станциями обработки, план-мастером диаметром 1900 мм, системой подачи полирующей суспензии (рис. 6) с температурной регулировкой, моечной станцией, фрезерной системой и системой числового программ-

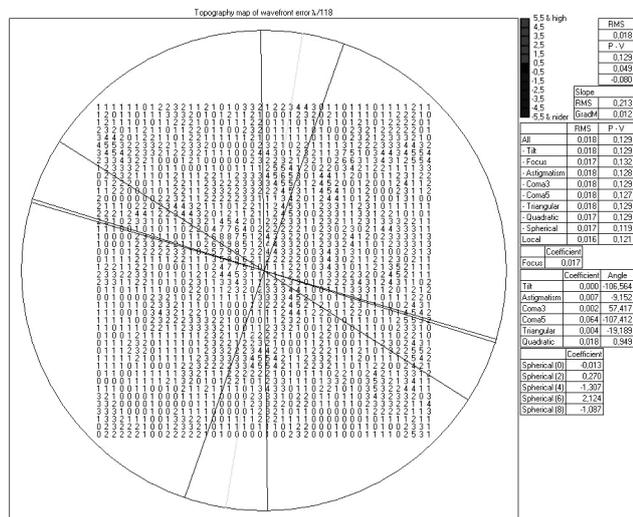
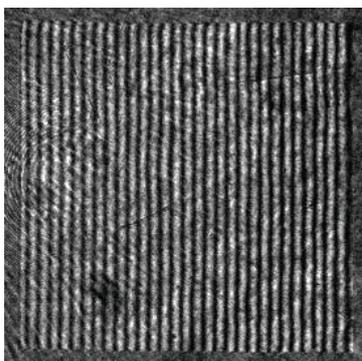
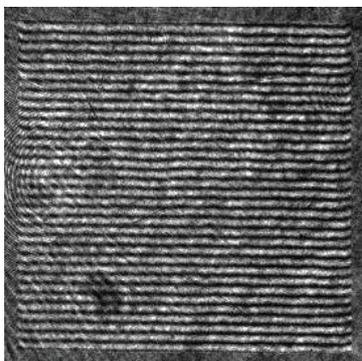


Рисунок 3.
Пример интерферограммы и карты волнового фронта, отраженного от поверхности детали после обработки на станке непрерывной полировки и финишной полировки

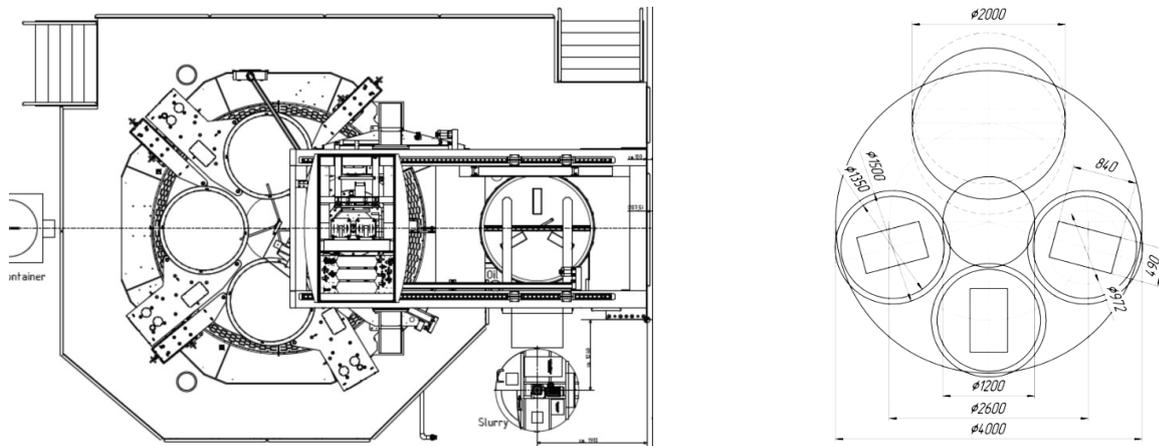


Рисунок 4.
Схема станка FLP-4000

ного управления. Станок предназначен для обработки деталей с диаметром описанной окружности до 1050 мм. Он был введен в эксплуатацию совместно с фирмой FLP. Также фирма FLP оказала содействие в настройке режимов работы оборудования станка, в отработке режимов управления инструментом и фрезерной частью станка.

В ходе освоения станков возникла необходимость внесения ряда изменений в настройке станков, которые были осуществлены фирмой FLP.

Увеличившиеся габариты, как обрабатываемых деталей, так и самого станка потребовали внесения изменений в ранее отработанные технологические программы.

Изготовление деталей с габаритами 800×400×40 мм из специального стекла требует аккуратного подбора не только параметров работы станка, полирующих смол и полирующих суспензий, но и выполнения температурных параметров, как полирующей суспензии, так и окружающей среды.



Рисунок 5.
Общий вид станка FLP-4000

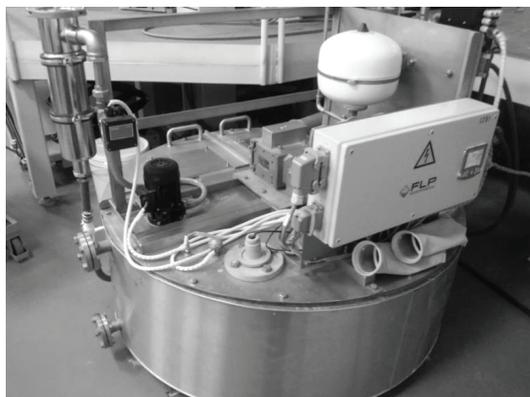


Рисунок 6.

Система подачи суспензии станка FLP-4000

Для обеспечения чистоты изготавливаемых поверхностей, а так же температурных параметров окружающей среды оба станка установлены в чистое производственное помещение с особыми климатическими условиями.

Для обеспечения удобства работы станки FLP-4000 и FLP-2.2 были дополнительно оснащены пневматическими манипуляторами. Манипуляторы позволяют за короткий промежуток времени производить установку и снятие обрабатываемых деталей. Эта процедура выполняется одним оператором. Установка детали производится в специально разработанную оснастку, позволяющую удерживать деталь в нужной позиции и при необходимости обеспечивать детали дополнительное вращение.

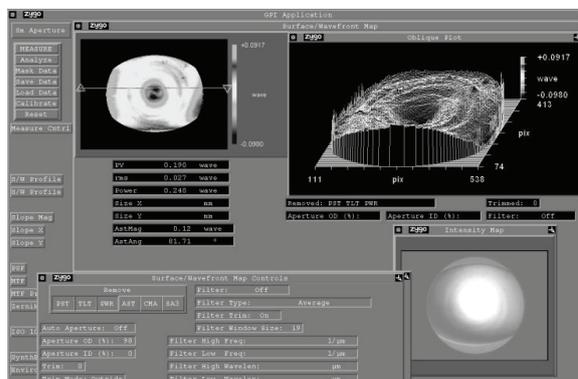


Рисунок 8.

Результаты аттестации эллиптического зеркала

Дальнейшее развитие парка станков непрерывного полирования в АО ЛЗОС было связано с введением в эксплуатацию станка FLP-1200, предназначенного для формообразования плоских деталей с диаметром описанной окружности до 400 мм. Станок оснащен гранитным рабочим кругом диаметром 1200 мм, двумя станциями обработки, план-мастером диаметром 600 мм, системой подачи полирующей суспензии, моечной станцией, фрезерной системой и системой числового программного управления (рис. 7).

На станке FLP-1200 проводится изготовление разнообразных деталей с плоскими рабочими поверхностями. Так, для детали – поворотное зеркало с эллиптической формой образующей и габаритами 180×130×40 из сте-



Рисунок 7.

Общий вид станка FLP-1200



Рисунок 9.

Пример блока для обработки призматических деталей для станка FLP-1200

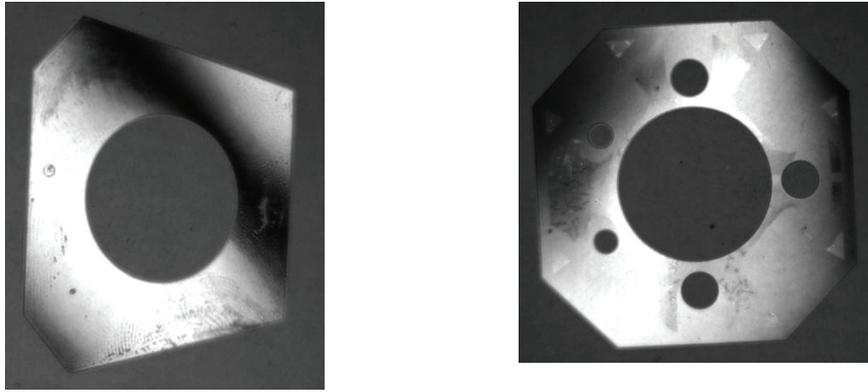


Рисунок 10.

Интерференционные картины обработанных на станке FLP-1200 граней

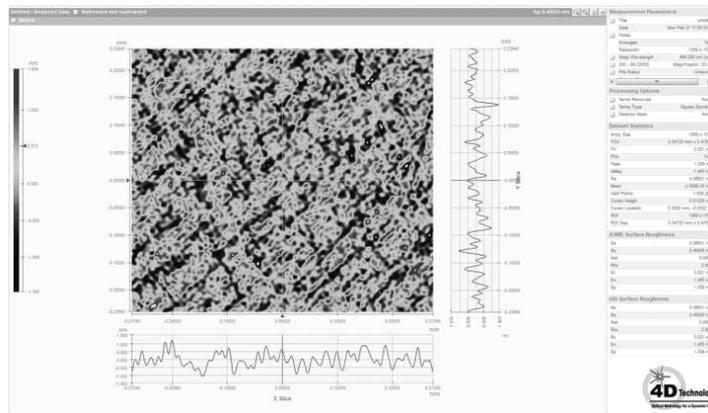


Рисунок 11.

Результаты контроля шероховатости деталей, обработанных на станке FLP-4000

клокристаллического материала ситалл, получено качество поверхности по плоскостности не более 70 нм по параметрам N и ΔN (рис. 8).

Кроме оптических деталей с плоскими поверхностями на станке FLP-1200 проводится обработка блоков сложных корпусных призматических деталей. Для этого потребовалась разработка специальной контактной оснастки, что позволило адаптировать станок FLP-1200 и изготавливать эти призматические детали в блоке с достижением отклонения обрабатываемых поверхностей от плоскости менее 100 нм (рис. 9,10).

Благодаря имеющемуся диаметру станции обработки, на станке может быть обработано одновременно до 24 деталей, что значительно больше, чем при обработке на станках классического типа.

При обработке деталей на станках непре-

рывного полирования практически происходит только управление формой полировального инструмента (стола). После проведения технологической отработки режимов, работа станка происходит в полуавтоматическом режиме. Оператор выполняет контроль за правильностью работы агрегатов станка, производит установку и снятие деталей, проверяет соответствие полирующего материала.

Для специальных оптических стекол параметр микрошероховатости полученный при обработке пластин из специального оптического стекла удалось получить на уровне 5Å (рис. 11).

Применение станков непрерывного полирования позволило сократить время изготовления деталей в 2 раза, повысить точность и снизить (улучшить) микрошероховатость обрабатываемых поверхностей.

КРИОСКОПИЧЕСКИЙ-НЕФЕЛОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА КОЛЛОИДОВ

АЛЕХНОВИЧ В.И., МЕЛЬНИКОВ Д.М., ЯКИМОВА М.А.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: vial@bmstu.ru, Daenoor@gmail.com, marya.korotaeva@yandex.ru

Работа посвящена описанию криоскопического-нефелометрического метода анализа содержания металлических примесей в коллоидных растворах (например, в нефтепродуктах), а так же процессу выбора оптимальной длины волны для анализа.

Ключевые слова: нефелометрия, коллоидные растворы, охлаждение.

Лазерные методы определения состава различных веществ являются одними из самых распространенных и перспективных. Высокая селективность, обусловленная монохроматичностью и направленностью излучения, позволяет производить покомпонентный анализ многокомпонентных веществ. При формировании полезного сигнала может быть использована зависимость от параметров компонента поглощения, рассеяния, поляризации, показателя преломления и др. параметров излучения. Рассмотрим случай исследования состава многокомпонентных веществ, в которых оптимальным является использование зависимости концентрации компонента от коэффициента рассеяния излучения. К таким веществам относится большое количество веществ, таких как нефтепродукты, пищевые продукты, биологические жидкости, во многих случаях – вода, и др. Большой интерес представляют те из них, в которых одна фракция представляет собой коллоидный раствор, вторая – взвешенные в нем частицы большего диаметра.

Даже при использовании лазерных источников излучения для анализа многокомпонентных веществ возникает ряд сложностей, связанных с перекрытием спектров взаимодействия излучения с компонентами.

В ряде случаев, когда размеры компонентов существенно различны, можно разделить сигналы от компонентов, подбирая длины

волн, рассеиваемые одними компонентами и не взаимодействующие с другими [1].

Однако во многих случаях, например, при определении концентрации посторонних примесей в коллоидных растворах (например, металлических частиц в нефтепродуктах) невозможно даже приблизительно предсказать размеры частиц, и, следовательно, подобрать интенсивно рассеиваемую или поглощаемую длину волны. В таких случаях требуется более сложная методика выделения сигнала от частиц. Одним из таких методов является криоскопический-фотометрический метод. Метод основан на определении оптической плотности пробы в процессе образования кристаллов при замерзании [2]. Если рассматривается интервал температур, в котором металлические примеси не будут являться центрами зарождения новых кристаллов, коэффициент их рассеяния будет оставаться постоянным, в то же время коэффициент рассеяния коллоидных частиц будет возрастать в результате увеличения размеров кристаллов.

Процесс переноса излучения в рассеивающей среде можно охарактеризовать с помощью коэффициентов поглощения, рассеяния или ослабления излучения. В случае металлических частиц эти коэффициенты существенно различны. Для прозрачных диэлектрических частиц поглощение практически отсутствует и коэффициенты ослабления и рассеяния можно считать равными.

Согласно теории Ми, коэффициент ослабления излучения одиночной частицей определяются из выражения (1) [3]:

$$-k = \frac{2\pi}{k_0^2} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \cdot (a_n + b_n), \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения; n_2 – показатель преломления среды; Re – действительная часть; a_n и b_n – функции рассеяния, определяемые по соотношения (2) и (3):

$$a_n = \frac{m \cdot \psi_n(mx) \cdot \psi_n'(x) - \psi_n(x) \cdot \psi_n'(mx)}{m \cdot \psi_n(mx) \cdot \xi_n'(x) - \xi_n(x) \cdot \psi_n'(mx)} \quad (2)$$

$$b_n = \frac{\psi_n(mx) \cdot \psi_n'(x) - m \cdot \psi_n(x) \cdot \psi_n'(mx)}{\psi_n(mx) \cdot \xi_n'(x) - m \cdot \xi_n(x) \cdot \psi_n'(mx)} \quad (3)$$

Где функции определяются из соотношений (4)-(6):

$$\psi_n(x) = x * J_n(x) \quad (4)$$

$$\xi_n(x) = x * H_n(x) = x * (J_n(x) + i \cdot Y_n(x)) \quad (5)$$

$$m = n - i\chi, \quad (6)$$

Где m – комплексный показатель преломления вещества, χ – показатель поглощения вещества, n – показатель преломления, k_0 – волновой вектор, определяемый по формуле (7):

$$k_0 = \frac{2\pi n}{\lambda} \quad (7)$$

где λ – длина волны.

$J(x)$ – функция Бесселя первого рода, $Y_n(x)$ – функция Бесселя второго рода, $H_n(x)$ – функ-

ция Ханкеля первого рода, переменные q и x определяются из выражений (8) и (9):

$$q = a \cdot k \quad (8)$$

$$x = m \cdot q \quad (9)$$

Коэффициент ослабления излучения для группы частиц (10):

$$K = N_0 \int_0^{\infty} k_p(r) g(r) dr, \quad (10)$$

где N_0 – концентрация частиц в слое, $g(r)$ – функция распределения частиц в слое по размерам.

Так, частицы, образующие коллоидные растворы (их размеры составляют приблизительно от 10 до 300 нм), интенсивно рассеивают излучение длин волн УФ- и синезеленого диапазона. В то же время, более крупные частицы рассеивают излучение в более широком спектральном диапазоне. Демонстрирующие этот факт графики приведены на рисунках 1 и 2. Графики на рис. 1 приведены спектры рассеяния, соответствующие диэлектрическим частицам, размеры которых составляют 50 ± 10 нм, на рисунке 2 – 1000 ± 100 нм, на рисунке 3 – для металлических частиц с диаметрами 800 ± 200 нм.

Из этой зависимости видно, что размеры частиц существенно влияют на значение коэффициента ослабления, что делает этот параметр неудобным для анализа. По этой причине разделение сигнала от металлических частиц и коллоидного раствора, заложенное в основе криоскопического-фотометрическо-

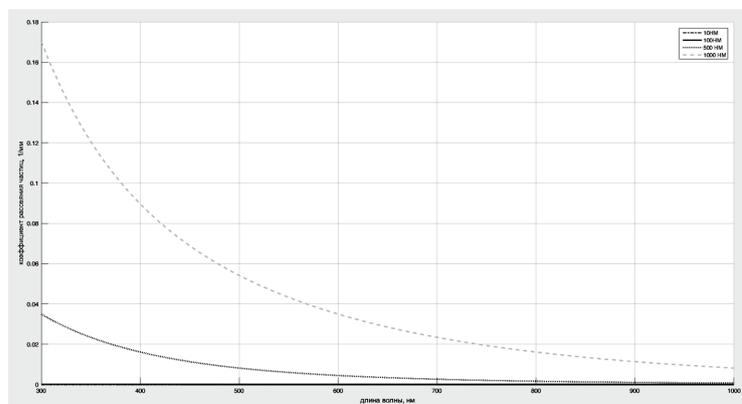


Рисунок 1.

Зависимость коэффициента ослабления излучения частицами от длины волны

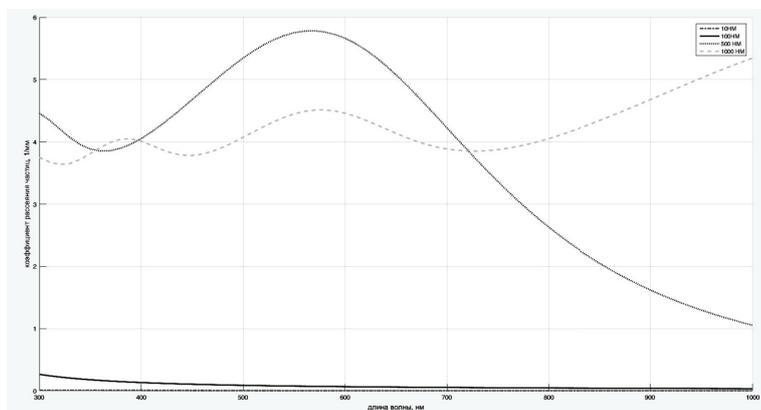


Рисунок 2.

Зависимость коэффициента ослабления излучения металлическими частицами от длины волны

го метода, позволят избежать погрешности, вызванной возможным наличием металлических частиц различных размеров.

Метод заключается в определении изменения показателя ослабления пробы в процессе ее охлаждения. Условия проведения экспериментов подбираются таким образом, чтобы:

Металлические примеси не являлись центрами кристаллизации;

Рост кристаллов происходил равномерно во всей анализируемой области;

Показатель преломления и коэффициент поглощения растущих кристаллов существенно не изменялись в процессе охлаждения.

Расстояние между кристаллами достаточно велико, чтобы рассеяние можно было считать независимым.

Выполнение этих условий во многом зависит от выбора режима охлаждения: начальная и конечная температуры не должны приближаться к температуре кристаллизации, скорость охлаждения не должна превышать 7°/мин. Важны геометрические параметры пробы: ее толщина должна быть достаточно малой, чтобы рассеяние можно было считать однократным, а площадь достаточно большой, чтобы краевые эффекты не оказывали влияние на результаты экспериментов.

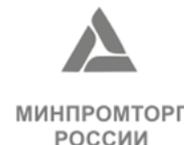
Кроме того, для криоскопического-нефелометрического метода крайне важное значение имеет выбор длины волны излучения. Значение коэффициента ослабления излучения на этой длине волны должно существенно зависеть от размера частиц, образующих

коллоид, а значение коэффициента ослабления излучения металлическими частицами должно быть отличным от нуля. Спектральной области с длинами волн 300 – 550 соответствует наибольшая крутизна графика спектральной зависимости ослабления, таким образом, малое изменение размеров частиц будет соответствовать большему изменению коэффициента ослабления. Это дает возможность более надежно выделить постоянную составляющую сигнала при меньшей продолжительности эксперимента. Кроме того, в этой спектральной области существуют доступные, удобные в использовании источники лазерного излучения. Постоянство сигнала от металлических частиц избавляет от необходимости учитывать сложную спектральную зависимость коэффициента ослабления для металлов.

Список литературы

1. Кортаева М.А., Григорьянц А.Г., Алехнович В.А. Адаптивные измерения параметров полидисперсных сред оптическим методами Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, сер. Естественные науки 2012, Спец. выпуск «Прикладная математика и механика», С. 55-65.
2. Мельников Д.М., Шиганов И.Н. Определение низкотемпературных свойств дизельных топлив путём экспресс-анализа жидких, Технология Машиностроения, 2011, №11, С. 65-67.
3. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами, М.: Мир, 1972, 165 с.

ИНФОРМАЦИЯ



Всероссийская научно-техническая конференция «Инновационные проекты в оптико-электронном приборостроении» («Инновации ОЭП-2016»)

Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, тел./факс: +7(499) 267-67-54; +7(499) 261-86-02,
e-mail: nukrlm@bmstu.ru
№ 28/246 от 01.06.2016 г.

20-21 октября 2016 г. в Московском государственном техническом университете
имени Н.Э. Баумана состоится
Всероссийская научно-техническая конференция
**«Инновационные проекты в оптико-электронном приборостроении»
(«Инновации ОЭП-2016»)**

Целью конференции

является развитие инновационного потенциала предприятий
Холдинга и Университетов, а также сближение, коммуникация специалистов
Университетов с промышленностью.

Организаторы конференции:

- Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
- Холдинг АО «Швабе»
- Учредитель и издатель – Общественная научно-техническая академия «Контенант»

На конференции предлагаются к обсуждению научно-технические проблемы и вопросы
по следующим секциям:

Секция №1

- Организация инновационной деятельности в оптико-электронном приборостроении

Секция №2

- Инновационные проекты. Гражданская продукция: технологии, продукты, решения, услуги

Секция №3

- Инновационные проекты. Продукция двойного назначения: технологии, продукты, решения

Участие в конференции:

Для выступления на конференции следует прислать заявку и тезисы докладов
по прилагаемой форме по адресу:

e-mail: nukrlm@bmstu.ru

до 30 июля 2016 г.

Официальный сайт конференции:

www.contentant-conf.ru

ПРИЦЕЛЫ ДЛЯ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ РАЗРАБОТКИ КМЗ

КИСЕЛЕВ И.И., МАЙКОВ Б.П., ТАРАСОВ А.П.

ПАО «Красногорский завод им С.А. Зверева»

E-mail: kmz@zenit-kmz.ru

В статье рассмотрены оптические прицелы для стрелкового оружия, разработанные и изготовленные ПАО «Красногорский завод им С.А. Зверева» с момента создания предприятия, сформулированы основные требования, предъявляемые к прицелам современных снайперских комплексов, приведены технические характеристики прицелов.

Ключевые слова: оптический прицел, снайперское оружие, угол прицеливания, устойчивость к воздействию ударных нагрузок.

Снайперское оружие с момента появления в условиях меняющейся в разное время тактической концепции пережило несколько взлетов и падения своей востребованности и активного применения.

Региональные конфликты последних десятилетий, особенности ведения современных локальных войн, показали, что живая сила несёт значительные потери преимущественно от стрелкового оружия, в том числе и снайперского, эффективность которого высоко оценивается в позиционной войне, антитеррористических операциях при выполнении задач селективного поражения живой силы противника, а также легкобронированных целей при помощи крупнокалиберных снайперских винтовок.

Появление первых оптических прицелов относится к XVIII веку, когда к оружию начали приспособлять подзорную трубу, используемую вначале для наблюдения, а затем и для производства выстрела, однако дата рождения снайперского оружия относится к периоду 1861-1865 гг. Гражданской войны в США - началу практического использования телескопических прицелов на винтовках.

В Европе прицелы появились во время первой мировой войны в германской армии,

оснастившей несколько тысяч винтовок Маузер оптическими прицелами фирмы Carl Zeiss.

Прицелы имели 4-х кратное увеличение и позволили поднять дальность прицельного выстрела до 1 км.

В России собственных оптических прицелов в то время не было, всё оптическое производство [1] в эти годы было сосредоточено в мастерских Подольского оптического завода, состоявших из бывших рижских филиалов германских фирм Zeiss и Gerz, оптическом отделе Обуховского завода и заводе Российского общества оптического и механического производства, поэтому первые прицелы Россией были закуплены в 1925 году в Германии.

Предназначались они для изучения и создания на их базе отечественных моделей. Работа была поручена КБ на Подольском оптическом заводе, который должен был разработать и изготовить 10 опытных образцов прицелов к октябрю 1927 года.

Однако к этому времени были изготовлены только механические детали и дальнейшая судьба создания первых отечественных прицелов для снайперского оружия связана с нашим заводом, в связи с переводом Подоль-

ского завода в Красногорск и основанием на его базе завода точной механики №19, ставшего Красногорским механическим заводом.

Первые два образца из заказанных 10 прицелов были переданы в Артиллерийский комитет (Артком) РККА для испытаний, которые закончились неудачно, и дальнейшая работа над этими прицелами в 1929 году была прекращена, а заводу была поручена разработка прицелов другой модели, по результатам изготовления и испытания которых, несмотря на имевшиеся замечания, вначале была изготовлена и поставлена партия прицелов в количестве 100 шт, а затем 2000 шт.

Эти образцы прицелов, были утверждены для валового [1] производства и получили наименование «Оптический винтовочный прицел образца 1930 г.», сокращенное наименование «прицел ПТ», означающего по одним источникам «прицел телескопический», по другим – «прицельная труба».

В 1931 г. из-за сложной механической части прицела его производство было прекращено, а конструктивно измененный прицел получил шифр ПЕ.

Этот прицел имел [2] отличные для того времени характеристики: увеличение - 4 крат, поле зрения 5,5 угл. град., диаметр выходного зрачка 7,6 мм, удаление выходного зрачка 80-85 мм, дистанционную шкалу от 200 до 1400 м, диапазон горизонтальных поправок ± 10 т.д., диоптрийной шкалы от -3 до +2 диоптрий, длина прицела была 300 мм, а масса 700 гр. Оптическая система прицела состояла из 9 линз.

Однако и в этой конструкции прицела имелось ряд недостатков, к основным из которых относились конструкция эксцентриковой системы ввода поправок и кронштейна. С кронштейнами прицелов было много проблем, изготовленные заводом №19 кронштейны оказались конструктивно сложными и ненадежными, кронштейны немецких прицелов для установки на винтовку Мосина образца 1891/1920 г. не годились.

После доработок в 1931 г. прицел с шифром «ПЕ» (рис. 1) был утвержден для валового производства. Изготовление прицелов «ПЕ»

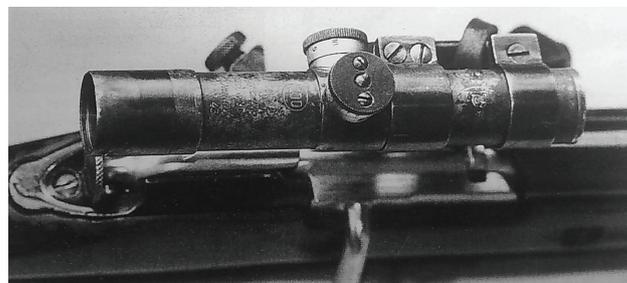


Рисунок 1.

Винтовочный оптический прицел ПЕ [2]

к концу 1933 г. достигло нескольких тысяч, а сам завод точной механики и оптики №19 в это время был переименован в завод №69.

К концу 1936 г. производство прицелов «ПЕ» было передано на завод «Прогресс» в Ленинград. Интересно отметить [2] что себестоимость изготовления прицелов на заводе «Прогресс» составляла 600 рублей, против 150 рублей на нашем заводе.

Первые отечественные прицелы ПЕ и ПТ устанавливались на снайперский вариант магазинной винтовки Мосина, переделанной в 1931 году из армейской винтовки образца 1891/30 года, которая несмотря на разработку в 1938 г. самозарядной винтовки Токарева (СВТ) оставалась основным оружием советских снайперов и в годы ВОВ, поскольку её меткость и кучность были по оценке специалистов в 1,5 раза выше, чем у винтовки ручного заряжания СВТ.

Недооценка роли и места снайперского оружия в предвоенное время в какой-то степени сказалась на больших потерях [3], которые понесли наши войска от финских снайперов («кукушек») в военном конфликте с Финляндией на Карельском перешейке в 1939-1940 гг.

Вместе с тем, полученный за эти годы опыт изготовления и эксплуатации оптических прицелов показал, что главной проблемой прицела являются прочность [4] основных корпусных деталей прицела и его крепление к оружию, устойчивость к воздействию ударных нагрузок при выстреле.

Основными замечаниями к прицелам после их испытаний являлись [4]: попадание смазки с винтов механизмов поправок на линзу оборачивающей системы, сбивание уста-

новок барабанчиков механизмов выверки, осыпка на объективе и окуляре.

Вместе с тем нашим заводом в 1935 г. было произведено 12900, а в 1936 – 12200 прицелов.

Кроме прицела ПЕ в 1935 г. заводом была выпущена опытная партия прицела ПБ для автоматической винтовки Симонова (АВС), производство которого после испытаний было поручено одному из ленинградских предприятий.

В военные годы КМЗ изготовил для фронта более 80000 оптических прицелов для стрелкового оружия, передав в 1945 г. их последующее изготовление другим заводам, и сосредоточив свои усилия на опытно-конструкторских работах по созданию новых образцов прицелов.

Так, в 1946-1951 гг. были разработаны опытные образцы перископических прицелов ППКС для 7,62-мм автомата Калашникова, в 1951-1954 гг. – пулеметные ночные прицелы ППН и ППН-1, прицел ПРГ к ротному гранатомету, ночные прицелы СПН и СПН-1 для снайперской винтовки, прицелы «Пикет-2» и «Пикет-3» для карабина Симонова и крупнокалиберного пулемета.

Конечно, при элементной базе тех лет разрабатываемые ночные прицелы не могли удовлетворить по основным характеристикам требования заказчика. Так, например, опытные образцы ночного прицела для автомата Калашникова при дальности действия 200 метров, с подсветкой цели лампой-фарой, увеличении 2 крата, имели массу около 4 кг.

В 50-е годы XX-го столетия интерес к снайперскому оружию, даже у стран, которые с успехом применяли его во время 2-ой мировой войны, несколько упал. В структуре мотострелковых подразделений нашей армии количество штатных снайперов было сведено к минимуму, что не могло не сказаться как на совершенствовании снайперского оружия так и прицельной техники, только в 1958 году был объявлен конкурс на создание самозарядной снайперской винтовки, взамен стоявшему на вооружении снайперскому ва-

рианту винтовки Мосина 1891/1930 года.

Локальные военные действия после окончания второй мировой войны, борьба с терроризмом последних десятилетий, показали высокую эффективность меткого выстрела, обусловленную в большой степени применением высокоточного оптического прицела, претерпевшего к этому времени в своем развитии, наряду с винтовкой и патроном, многие принципиальные изменения [5].

Появление в армиях многих стран приборов ночного видения, лазерных дальномеров, мобильных средств связи, позволили существенно расширить возможности снайперских подразделений по разведке, обнаружению целей и ведению прицельного огня.

В США и странах Западной Европы для оснащения снайперского оружия, разрабатываются новые дневные и ночные оптические прицелы с самыми различными характеристиками.

Среди дневных прицелов, применяемых на снайперских винтовках калибров 7.62-мм и 12.7-мм *M24, M40A1, M82A1, US Navy Mk11 мод. 0 SWS, XM110 SASS* (США), *AW, AW50F* (Англия), *Heckler-Koch PSG 90, DSR-1* (Германия), *Sako TRG-22* (Финляндия), в основном, используются панкратические прицелы *Leupold Mark 4M 3-10X LR/T, Hensoldt «Sigt 90» 10x42, Schmidt-Bender PM 3-12 V 50M* и его модернизированный вариант *M8541 SSDS*.

С 1963 года в Российской армии принята в эксплуатацию самозарядная снайперская винтовка СВД с оптическим прицелом ПСО-1, имеющим, по сравнению с оптическими прицелами названных фирм, весьма скромные параметры: увеличение 4^x, поле зрения 6°, диаметр объектива 24 мм. ПСО-1 хотя и зарекомендовал себя в армейских кругах надежным и простым в обращении прицелом, не соответствует требованиям, предъявляемым к современным снайперским системам.

Прицелов с переменным увеличением, принятых на вооружение, до 2001 года в Российской армии не было.

Изменение стратегической концепции применения снайперского оружия, не замедлило

сказаться на больших потерях наших войск от снайперского оружия уже в Афганистане

Во время вооруженных действий на территории Чеченской республики [3] ежедневные потери Российской армии от снайперов, приходящиеся только на один мотострелковый полк, составляли 30 человек.

К началу 90-х годов большинство снайперского оружия США и НАТО было оснащено прицелами с переменным увеличением 10, 12 и более крат с объективами диаметром 40, 50 и 56 мм.

В декабре 1995 года КМЗ была поручена разработка для винтовки СВД нового дневного прицела 1П59 с переменной кратностью, получившего наименование «Гиперон» (рис. 2). Разработка и испытания прицела, включая Государственные, проходившие на двух полигонах МО не были простыми. Требования, предъявляемые к боевому оружию, в полной мере коснулись и прицела в части воздействия высоких динамических нагрузок на прицел при выстреле, обеспечения при этом основных параметров кучности и точности стрельбы.

Выбор диаметра входного зрачка прицела равным 40 мм, увеличения в диапазоне 3-10 крат с разрешающей способностью при максимальном увеличении не хуже 6 угл. секунд, позволили по сравнению с прицелом ПСО-1 почти в 2 раза повысить точность стрельбы на дистанции 600-1000 метров, увеличить более чем в 2,5-3 раза дальность обнаружения и распознавания цели, облегчить прицеливание в условиях низкой освещенности сумеречного времени. Так при $E_r = 1,5$ лк возможность прицеливания в разработанных панкратических прицелах сохраняется до дальности 600 метров по сравнению с дальностью 300 метров при прицеливании в ПСО-1.

Опыт разработки прицела «Гиперон», проведения испытаний на полигонах МО, позволили сформулировать основные требования к созданию прицела современного снайперского комплекса, основными из которых являются:

- обеспечение эффективной стрельбы на



Рисунок 2.

*Снайперский панкратический прицел 1П59
«Гиперон»*

дальностях 1000-1200 и более метров, с кучностью не хуже 2,5-3 см для дистанции 100 метров и поражением цели с первого выстрела, при минимальном времени на подготовку и производство второго выстрела не превышающем нескольких секунд;

- реализация механизмами прицела установки дальности до цели (углов прицеливания) с точностью не менее 10-15 метров;

- диаметр входного зрачка и увеличение прицела должны обеспечивать широкие функциональные возможности по обнаружению и распознаванию цели, в связи с чем увеличение прицела требуется иметь переменным, что позволяет варьировать полем зрения при поиске цели и обеспечить точный выстрел при максимальном увеличении и разрешении после её распознавания;

- оптическая схема прицела должна быть рассчитана исходя из обеспечения эксплуатации в условиях низкой освещенности, светопропускание прицела должно быть не ниже 80%, изображение предмета контрастным с правильной цветопередачей в видимом диапазоне спектра, наружные поверхности оптических деталей объектива и окуляра устойчивыми к их периодической чистке;

- конструкция прицела должна обладать возможностью компенсации параллакса, обеспечивать стабильность положения прицельной марки как при изменении увеличения, так и в условиях воздействия динамических нагрузок при выстреле, быть максимально простой и высоконадежной при эксплуатации в условиях воздействия внешних климатических факторов, что особенно важно для прибора, используемого армейским снайпером.

Для обеспечения прицельной стрельбы, особенно на дальностях, превышающих 600–700 м, по мнению многих специалистов, измерение дальности до цели требуется производить с погрешностью, не превышающей 2,5–3 процента дальности, а установку углов прицеливания с погрешностью не более 1 угл. мин. Принятый в большинстве отечественных оптических прицелов способ измерения дальности с «базой» на цели по ростовой фигуре 1,7 м при помощи нанесённой на сетку кривой в форме «улиты», даёт приемлемые результаты до дальностей 400–500 м. Для больших дальностей, точность измерения из-за малой крутизны кривой для этих значений дальностей составляет 50 и более метров, что даёт ошибку при установке угла прицеливания и, соответственно, приводит к смещению точки попадания на 30 см для дальности 500 м, и 80 и 145 для дальностей 800 и 1000 м соответственно.

Реализовать возможность создания прицелов с учетом вышеназванных требований стало возможным в результате проведённого ОАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева» комплекса работ в ОКР «Взломщик» по созданию нескольких моделей дневных панкратических прицелов для современных снайперских комплексов калибров 7,62-мм, 9-мм и 12,7-мм.

На базе прицела «Гиперон» были разработаны модели панкратических прицелов 1П69 (рис. 3), 1П70 и 1П71-1 (рис. 4) для новых армейских снайперских комплексов калибра 7,62-мм на винтовке СВ-98, 9-мм на винтовке СВДК и 12,7-мм на винтовке АСВК.

Разработанные прицелы имеют унифицированную оптическую систему, обеспечивают обнаружение цели, определение дальности до неё с одновременной автоматической установкой углов прицеливания и позволяют вести прицельную стрельбу при видимом увеличении от 3 до 10 крат в дневное и сумеречное время. Полигонные и государственные испытания прицелов показали их преимущество перед другими дневными прицелами по дальности обнаружения и распознавания цели, точности и кучности боя.



Рисунок 3.

Снайперский панкратический прицел 1П69 на винтовке СВ-98

В прицелах 1П59, 1П69, 1П70 и 1П71-1 форма и размеры дальномерных знаков позволяют измерять дальность до цели по ростовой и поясной фигурам, размеру плеч и обеспечивают измерение дальности на дистанциях стрельбы более 500 м в 1,4–1,6 раза точнее, чем по шкале формы «улиты».

Механизм установки угла прицеливания (дальности) в панкратических прицелах ОАО КМЗ плавный, отсчёт дальности осуществляется по круговой шкале, находящейся в поле зрения стрелка, что не требует при установке угла прицеливания отрыва глаза от прицела. При небольшом навыке погрешность установки дальности (известной или измеренной) в панкратических прицелах «Гиперон» составляет 10–15 м, а погрешность ввода углов прицеливания - не более одной угловой минуты.

Для удобства работы круговая шкала дальностей, находящаяся в поле зрения прицела сдублирована с механической шкалой, нанесённой снаружи на корпусе визира. Большое влияние на точность стрельбы оказывает также конструктивное выполнение механизма выверки прицела, который, с одной стороны, должен обеспечивать необходимый диапа-



Рисунок 4.

Снайперский панкратический прицел 1П71 для крупнокалиберной винтовки 6В7

зон перемещения прицельной марки, используемый для приведения оружия с прицелом к нормальному бою и введения поправок при стрельбе за метеорологические и баллистические факторы, с другой — для повышения точности перемещения прицельной марки иметь минимально возможный шаг дискретного механизма.

Цена деления шкал механизмов выверки в прицелах 1П59, 1П69, 1П70 и 1П71-1 составляет от 0,1 до 0,25 т.д. (для разных моделей) против 0,5 т. д. в прицеле ПСО-1, при диапазоне работы этого механизма 10 т. д. у обоих прицелов, что позволяет в этих прицелах в два и пять раз, соответственно, точнее вводить поправки за изменение метеорологических и баллистических условий стрельбы и деривацию.

Существенным преимуществом панкратических прицелов является возможность ведения стрельбы на выбранной дальности с любым увеличением из диапазона 3–10 крат без изменения установленного значения угла прицеливания, что в большей степени облегчает задачу поиска и распознавания цели, повышения точности стрельбы и сокращения времени подготовки первого выстрела.

Прицелы ОАО КМЗ снабжены устройством подсветки сеточных узлов с регулировкой яркости, источником питания которого служит литиевый элемент ER6S напряжением 3,4 В, обеспечивающий длительный режим работы в условиях изменения температуры окружающей среды от минус 40°С до плюс 50°С.

Все названные прицелы по сравнению с отечественными и рядом зарубежных аналогов имеют следующие преимущества:

- переменное, плавно изменяемое увеличение в диапазоне от 3 до 10 крат;
- автоматический ввод углов прицеливания по базовым целям (ростовая, поясная и плечевая фигуры), что для снайпера, существенно сокращает время подготовки выстрела и упрощает задачу наведения на цель;
- возможность стрельбы для выбранной дальности с любым увеличением из диапазона 3-10 крат без изменения угла прицелива-

ния, что обеспечивает повышение точности стрельбы и также сокращает время на подготовку выстрела;

- введение шкалы дальности (углов прицеливания) в поле зрения прицела и установка измеренной или известной дальности при помощи специального приводного кольца, обеспечивающего функции автоматической установки угла прицеливания как по базе на цели, так и по известной (измеренной) дальности, позволяют снайперу изменять угол прицеливания и увеличение без отрыва глаза от поля зрения и избегать, таким образом, потери цели;

- высокая точность установки измеренной или известной дальности при помощи баллистической шкалы, размещенной по внешнему контуру поля зрения прицела и отградуированной в гектометрах. При незначительном навыке точность установки дальности может составлять 10-15 м.

В общем случае [7] расчет оптической системы панкратического прицела и выбор его основных параметров: увеличение, поле зрения, коэффициент светопропускания, диаметры входного и выходного зрачков, должны происходить с учетом реальных условий работы глаза по обнаружению и распознаванию цели, яркости изображения местности и её распределения в поле зрения, масштабу и форме изображения цели, контраста изображения и других факторов, обеспечивающих условия видимости, превышающие пороговые значения адаптации глаза.

Разработка и изготовление прицелов 1П59, 1П69, 1П70, 1П71-1, для снайперских комплексов потребовали реализации ряда сложных расчётно-конструкторских и производственно-технологических решений, из которых можно выделить: создание функционально связанных высокоточных кулачковых механизмов изменения увеличения и угла прицеливания, обеспечение точности и жесткости подвижных деталей и узлов прицела, сохранение их точностных параметров и чистоты поля зрения в условиях действия высоких (200-300 г) ударных нагрузок при выстреле и заданном температурном диа-

пазоне, создание специального контрольно-юстировочного и испытательного оборудования для нового класса высокоточных прицелов в обеспечение их серийного производства.

Требуемая точность установки углов прицеливания в созданных моделях обеспечивается точностью изготовления баллистического кулачка прицела, технологический процесс изготовления которого предусматривает выполнение с дискретностью 1 углового градуса каждого из значений радиус-вектора профиля кулачка с погрешностью несколько микрон с последующим контролем профиля кулачка на оригинальном стенде.

В рамках выполнения работ по ОКР «Взломщик» были также разработаны оригинальные модели прицелов 1П73 и 1П74, в которых установка углов прицеливания выполнена независимой, раздельной от изменения увеличения.

Следующим этапом для нашего предприятия в разработке прицелов для современных снайперских комплексов явилась ОКР «Ратник» по созданию панкратических прицелов для снайперского оружия нормального и крупного калибров, пулеметов крупного калибра, прицелов постоянного увеличения для пулеметов нормального калибра.

Отличительными особенностями новых моделей панкратических прицелов 1П88-1,-2,-3,-4-5 (рис. 5), являются:

- выполнение визирно-прицельного модуля панкратических прицелов унифицированным, с возможностью функциональной замены его при эксплуатации;
- обеспечение коэффициента светопропускания прицелов не ниже 90%;



Рисунок 5.

Снайперский панкратический прицел 1П88-2 для крупнокалиберной винтовки 6В7М

- индикация в поле зрения прицела установленной дальности (угла прицеливания);

- точность установки дальности (угла прицеливания) не менее 20 метров для шкалы дистанции в гектометрах или 0,1 т.д. для шкалы дистанции в тысячных;

- обеспечение точности ввода баллистических и метеопоправок, поправок на приведение оружия к нормальному бою не хуже 0,2 гм (0,1 т.д.).

- установка дальностей (углов прицеливания) по шкале, расположенной в поле зрения прицела, а не по наружной шкале механизма выверки, что позволило исключить необходимость счета щелчков и пользования для этих целей наружной шкалы механизма выверки;

- установка во втором фокусе еще одной шкалы измерения дальности по нескольким базовым целям.

- изготовление прицела на заводе с базовым начальным углом, что сводит к минимуму операции по его приведению к нормальному бою.

Реализация этих требований определила необходимость использования сеточных узлов в первом и втором фокусах оптической системы с расположением основной прицельной сетки вида Mil-Dot для прицелов 1П88-1, 2, 3, 4, 5 в первом фокусе, а шкалы дистанции в гектометрах или тысячных и дальномерной шкалы во втором фокусе.

Принципиальной особенностью созданных моделей прицелов является обеспечение их светопропускания на уровне 90 %, что для панкратических прицелов позволило по этому показателю встать в один ряд с лучшими мировыми образцами. Этот результат достигнут благодаря разработке оригинальной технологии нанесения просветляющих покрытий оптических деталей прицелов, в первую очередь сеток, как первого, так и второго фокусов.

К достоинству разработанных прицелов следует отнести повышение оперативности поиска, обнаружения и распознавания цели, сокращение времени на подготовку выстрелов, увеличение дальности прицельной стрельбы, введение шкалы углов прицеливания в поле

зрения прицела с высокоточной индикацией установленного значения угла прицеливания, применение 2-х типов шкал для определения дальности до цели оптическим методом.

Актуальным в создании современных прицелов в настоящее время является оснащение их встроенными лазерными дальномерами и баллистическими вычислителями, разработка интеллектуальных прицелов с электронным перемещением прицельной марки, измерением и вводом большого количества метео и баллистических параметров. Аналогами таких прицелов являются прицелы Hensoldt Sights (Германия), прицелы с системой BORC, прицелы Trijicon (США).

В условиях жесткой конкурентной борьбы за рынок сбыта продукции как в Российской Федерации так и за рубежом, предприятию необходимо уделять постоянное внимание работам по совершенствованию функциональных возможностей прицелов, повышению их эксплуатационной надежности, снижению трудоемкости изготовления и себестоимости приборов.

В этой связи, к числу первоочередных задач по модернизации существующих моделей и разработке перспективных образцов прицелов, следует отнести:

- повышение качества изображения, светотехнических параметров, уменьшение массо-

габаритных характеристик за счет применения в оптических схемах прицелов асферической оптики;

- разработка и внедрение конструкторских и технологических решений по исключению осыпки в приборах;

- уменьшение трудоемкости сборочных работ за счет изготовления механических деталей с назначенными в конструкторской документации предельными отклонениями.

Список литературы:

1. Давыдов Б., Савченко С. Советские оптические прицелы 1920-1940-х, Журнал Мир оружия, апрель 2005, С.17-19.

2. Давыдов Б., Савченко С. Советские оптические прицелы 1920-1940-х, Журнал Мир оружия, апрель 2005, С.16-23.

3. Рязанов О.Е. Законы снайперской войны // Москва «Восточный горизонт» 2003, С.12

4. Давыдов Б., Савченко С. Советские оптические прицелы 1920-1940-х, Журнал Мир оружия, май 2005, С.52-59.

5. Огнестрельное оружие/ред. группа:М.Аксенова, С. Кузнецов, Е.Евлахович и др., М.: Мир энциклопедий Аванта+, изд. «Астрель», 2010г.

6. Ян Хогг Снайперские винтовки //М.: Изд-во Эксмо-Пресс, 2000, С.144.

7. Травникова Н.П. Эффективность визуального поиска, М.: Машиностроение, 1985, С.128.

ПОЗДРАВЛЕНИЕ БУРСКОМУ ВЯЧЕСЛАВУ АЛЕКСАНДРОВИЧУ



12 мая 2016 года исполнилось 70 лет замечательному человеку и одному из лучших руководителей предприятий Республики Беларусь – генеральному директору ОАО «Минский механический завод имени С.И.Вавилова – управляющая компания холдинга «БелОМО» Бурскому Вячеславу Александровичу.

Более 45 лет своей трудовой деятельности Вячеслав Александрович посвятил становлению оптического приборостроения не только в Республике Беларусь, но и оказал большое влияние на развитие предприятий оптической отрасли Российской Федерации.

В 1970 году Вячеслав Александрович пришел на Минский механический завод имени С.И. Вавилова в качестве инженера-технолога и за годы работы на предприятии ему покорились все ступени карьерной лестницы: старший инженер-технолог, начальник бюро (1970-1975), заместитель главного технолога, начальник технологического отдела (1975-1978), главный технолог (1978-1984), главный инженер (1984-1992).

Благодаря богатому управленческому опыту, хорошему знанию технологических процессов и экономических вопросов, а также настойчивости в выполнении поставленных задач, Бурский В.А. в 1992 году возглавил Белорусское оптико-механическое объединение (БелОМО) и Минский механический завод имени С.И. Вавилова.

Работая в промышленности, Вячеслав Александрович занимался и научной работой - применял фундаментальные знания на практике, внедрял их на производстве. В 2001 году им была защищена диссертация, в 2005 году присвоено ученое звание профессора. Бурский В.А. автор более 100 научных трудов, в том числе 3-х монографий, имеет 11 авторских свидетельств и 43 патента.

За личный вклад в развитие промышленности Республики Беларусь награжден орденами «Знак Почета» и «Отечества» III степени, а так же присвоены звания Лауреата Государственной премии БССР и Заслуженного работника промышленности Республики Беларусь.

За годы работы в качестве генерального директора, Вячеслав Александрович передает свой опыт молодежи, обучает искусству руководителя. Ряд управленцев, прошедших управленческую школу по руководством Бурского В.А., сейчас работают директорами предприятий и государственными деятелями не только в Республике Беларусь, но и за ее пределами.

Уважаемый Вячеслав Александрович, сердечно поздравляем Вас со знаменательным событием в жизни! Мы высоко ценим Вас как организатора производства и выражаем благодарность за многолетний и добросовестный труд, огромную самоотдачу и трудолюбие, профессиональное мастерство и личный вклад в развитие оптической промышленности Белоруссии и России.

От всей души желаем Вам крепкого здоровья, счастья и благополучия. Пусть каждый день несет Вам радость и удачу, а оптимизм и вдохновение не покидает Вас никогда.

Коллектив ОАО «Минский механический завод им. С.И. Вавилова – управляющая компания холдинга «БелОМО»

Президиум Общественной академии «Контенант»

ПАМЯТИ БЕЛОЗЁРОВА АЛЬБЕРТА ФЁДОРОВИЧА



**Государственный институт прикладной оптики,
Государственный оптический институт им. Д.С.Рожественского,
Общественная научно-техническая академия «Контенант»
с глубоким прискорбием извещают, что 4 июня 2016 года
скончался крупный ученый в области оптической науки**

БЕЛОЗЁРОВ АЛЬБЕРТ ФЁДОРОВИЧ

Белозеров Альберт Федорович родился в с. Бобровское Вологодской области. В 1960 году окончил Московское высшее техническое училище им Н.Э. Баумана по специальности «Оптические приборы» и с мая 1960 года работает в Государственном институте прикладной оптики. Из 56 лет работы в ГИПО 54 года работал на научных должностях, из них 30 лет (с 1975 года) в должности заместителя генерального директора по научной работе.

А.Ф. Белозеров активно участвовал в становлении и развитии в ГИПО ряда научно-технических направлений: приборы для исследования неоднородностей в прозрачных средах, голографическая интерферометрия, дифракционная оптика и дифракционные решетки, тепловидение. Как научный руководитель ГИПО внес крупный вклад в комплексное развитие ИК техники в ГИПО: физические исследования окружающей среды, полупроводниковые материалы для приемников ИК излучения, асферическая оптика, технология оптических покрытий всех видов, оптико-электронные тепловизионные приборы первого, второго и третьего поколений, метрология оптико-электронных приборов в ИК области.

Приказом Министра оборонной промышленности СССР от 18 декабря 1981 года № 414 Белозеров А.Ф. был назначен научным руководителем одного из направлений оптического приборостроения «Приборы для исследования неоднородностей в прозрачных средах».

За это время Альберт Федорович сам прошел большую школу научной, организаторской и педагогической деятельности и воспитал плеяду учеников и последователей, составившую известную в стране школу исследований неоднородностей в прозрачных средах.

Альберт Федорович принимал личное участие в оснащении оптико-физической аппаратурой нового поколения аэродинамических лабораторий ЦНИИ Маш, ЦАГИ, ИВТ АН, ВВИА им. Н.Н. Жуковского, ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, НИИ ПММ при Томском государственном университете, в организации серийного производства 20 моделей теневых интерференционных и голографических приборов. С участием Белозерова А.Ф. свыше 20 разработок в области военной техники и технологий внедрены и приняты на снабжение армии, в том числе тепловизионные приборы «Тракт», «Акцепт», «Пособие-2», «Манчак», 1ПН79, 1ПН86-ВИ.

НПО ГИПО при активном участии Белозерова А.Ф. поддерживало тесные научно-технические связи с десятками ВУЗов Москвы, Санкт-Петербурга, Казани, Нижнего Новгорода, Саратова, Самары, Новосибирска и других городов, с ведущими академическими институтами РАН, СО РАН, Академиями наук Украины и Белоруссии, а сам Альберт Федорович в течение 14 лет читал несколько курсов лекций в Казанском государственном техническом университете: в 1991-2001 гг. в должности доцента, в 2002-2004 гг. – в должности профессора.

Под научным руководством А.Ф. Белозерова формировались годовые и перспективные планы НИОКР. При его участии в качестве председателя методической комиссии НТС по подготовке кадров высшей квалификации десятки сотрудников ГИПО защитили докторские и кандидатские диссертации. Лично Альбертом Федоровичем подготовлены 6 кандидатов наук по специальности «Оптика».

В 2005 году А.Ф. Белозеров был назначен Советником генерального директора по перспективным научным разработкам и федеральным целевым программам ФГУП «НПО ГИПО». С 2008 года по настоящее время занимал должность ученого секретаря АО «НПО ГИПО».

В течение 25 лет Альберт Федорович состоял членом редакционного совета «Оптического журнала», под его редакцией выпущено 3 специализированных выпуска журнала.

А.Ф. Белозеров неоднократно был членом оргкомитетов отечественных и международных конференций по прикладной оптике, избран председателем Поволжского регионального отделения «Оптического общества им. Д.С. Рождественского».

Трудолюбивый, настойчивый, по настоящему увлеченный и преданный своей профессии, Альберт Федорович являлся образцом служения делу. Он автор более 30 изобретений, 150 научных работ, в том числе трех монографий. Благодаря энциклопедическим познаниям в области оптики, ее истории и путей развития, знаниям работ своих коллег в других организациях страны и огромному, поистине подвижническому труду, в последние годы жизни им написана двухтомная монография «Оптика России».

Доктор технических наук, профессор, заслуженный машиностроитель Российской Федерации, Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, член-корреспондент Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, заслуженный работник промышленности вооружений, Альберт Федорович за свою долготелю и добросовестную работу награжден орденом «Знак Почета», медалями «За доблестный труд», «В память 1000-летия Казани», «Ветеран труда», медалями ВДНХ за разработку новой оптической техники, медалями и дипломами Оптического общества им. Д.С. Рождественского.

Альберт Федорович до последних дней своей жизни трудился, оказывая неоценимую помощь более молодым коллегам, был полон идей и планов на будущее.

Друзья и коллеги выражают глубокое соболезнование его семье и близким по поводу его кончины. Светлая память об Альберте Федоровиче останется в наших сердцах.