УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Латыев С.М., Иванов А.Н.

ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ СБОРНИК ЗАДАЧ



Санкт-Петербург 2015

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

С.М. Латыев, А.Н. Иванов

ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

СБОРНИК ЗАДАЧ

Учебное пособие для самостоятельной работы студентов по курсу «Основы конструирования оптико-электронных приборов и систем»

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2015

Латыев С.М., Иванов А.Н. Основы конструирования оптико-электронных приборов и систем. Сборник задач. Учебное пособие для самостоятельной работы по дисциплине «Основы конструирования оптико-электронных приборов и систем». – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 56 с.

В учебном пособии представлены задачи для самостоятельного решения по курсу «Основы конструирования оптико-электронных приборов и систем». Решение задач позволит студентам закрепить знания, полученные по курсу, и научит их самостоятельно проводить анализ конструкций оптических приборов с целью выявления первичных погрешностей и последующего их расчета.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 12.03.02 «Оптотехника». Также оно может быть полезно для студентов, обучающихся дисциплине «Основы конструирования оптических и лазерных приборов и систем» направления 12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии».

Рекомендовано к печати Ученым советом факультета ФиОИ от декабря 2015 г. протокол №

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО _ участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Университета Цель ИТМО становление исследовательского университета предпринимательского мирового уровня, по типу, ориентированного интернационализацию направлений на всех деятельности.

© Университет ИТМО, 2015

©Латыев С.М., Иванов А.Н., 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ	
САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ	5
1.1 Погрешности конструкций соединений	5
1.2 Погрешности конструкций функциональных устройств	7
1.3 Теоретические погрешности преобразователей	
1.4 Скалярные погрешности	12
1.5 Векторные погрешности	15
1.6 Зазоры в кинематических парах	17
1.7 Эксплуатационные погрешности	19
1.8 Погрешности наведения и считывания	21
1.9 Компенсация погрешностей	25
1.10 Погрешность позиционирования элементов	27
2. ИЛЛЮСТРАЦИИ К ЗАДАЧАМ	
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	52

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оптико-электронные приборы находят широкое применение в самых различных сферах человеческой деятельности: науке, технике, медицине, астрономии, военном деле и т.д. С их помощью решаются разнообразные задачи исследования физических явлений, контроля параметров выпускаемых изделий, оценки пространственного положения объектов.

Качество создаваемых приборов во многом определяется процессом проектирования, который позволяет материализовать идею разработчика и создать проект в виде конструкторского решения с учётом технологических, точностных, прочностных, эргономических и прочих требований. В связи с этим, требуется грамотный и квалифицированный подход к проектированию оптико-электронных приборов и устройств, позволяющий обеспечить необходимые на текущий момент требования к их показателям качества.

учебное пособие направлено на закрепление Данное знаний. получаемых бакалаврами в ходе изучения курсов по дисциплинам «Основы конструирования оптико-электронных приборов и систем» и «Основы конструирования оптических и лазерных приборов и систем». Эти дисциплины направлены на решение компетенций, связанных со способностью к анализу, расчету, проектированию и конструированию в соответствием с техническим заданием типовых систем, приборов, деталей и узлов оптотехники на схемотехническом и элементном уровнях; оценкой конструкторских решений, контролем конструктивных параметров оптиче ких, механических и оптико-электронных деталей и узлов.

Приведённые в пособии задачи охватывают вопросы, связанные с принципами конструирования основными деталей И узлов оптико-электронных приборов, выбором допусков них, на функциональным анализом конструкций оптических приборов, основами теории точности приборов и элементов, компенсационными методами повышения качества. Решение задач позволит студенту ознакомиться с погрешностями разнообразными первичными (теоретическими, методическими, эксплуатационными, технологическими, погрешностями наведения и считывания), встречающимися в оптических приборах различного назначения, и научится оценивать их виляние на результат работы прибора.

4

1. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1.1 Погрешности конструкций соединений

Основными эксплуатационными характеристиками качества погрешности положения рабочего соединений являются элемента относительно базового и деформации сопрягаемых деталей. Задачи этого раздела посвящены анализу конструкций соединений с целью выявления и учета факторов, влияющих на качество соединений. В случае, когда простановка допусков, требуется они должны быть указаны соответствии с правилами ЕСКД. Квалитеты должны соответствовать экономическому уровню точности технологических процессов.

Пример.

На рис. 1.1а и 1.1б. изображены конструкции микрометрических винтов с отсчетной шкалой, используемых в оптических измерительных приборах. Необходимо провести анализ конструкций, выявить первичные погрешности, влияющие на точность отсчета по шкале и сравнить конструкции по влиянию на точность измерения зазора в паре винт-гайка.



Рис.1.1 Конструкции микрометрических отсчетных винтов с конической (а) и цилиндрической (б) гайками.

Винтовой механизм позволяет преобразовать вращательное движение винта в его поступательное перемещение в соответствии с выражением $y = kt x/2\pi = kt N/N_{uu}$, где k - число заходов винта, t - шаг винта, x - угол поворота винта, N_{uu} - число делений круговой шкалы винта, N - угол поворота винта в делениях. Анализ конструкций винтовых механизмов позволяет выделить следующие первичные погрешности, приводящие к погрешности отсчета:

1. Погрешность шага винта Δt , приводящую к погрешности перемещения наконечника винта $\Delta y \approx \Delta t$;

1. Осевой зазор в резьбовом соединении винта и гайки Δc , приводящий к погрешности положения наконечника винта $\Delta y \approx \Delta c$;

2. Погрешность деления шкалы, нанесенный на винт ΔN , приводящую к погрешности положения наконечника винта $\Delta y = k t \Delta N / N_{uu}$;

3. Эксцентриситет шкалы винта Δe , вызванный перекосом корпуса винта, на который нанесена шкала, относительно оси вращения винта, приводящий к погрешности положения наконечника винта $\Delta y = (kt/2\pi)\Delta e/R_{uu}$, где R_{uu} - радиус корпуса шкалы.

4. Эксцентриситет сферического наконечника винта Δe_{H} , вызванный несовпадением центра кривизны наконечника и оси вращения винта. Эта погрешность проявляется только в случае неперпендикулярности поверхности, в которую упирается наконечник винта, оси винта. В таком случае возникает погрешность перемещения $\Delta y = (\cos(x) - \cos(x_{H})) \Delta e_{H} \Delta \gamma$, где $\Delta \gamma$ - наклон оси винта, x_{H} - начальное угловое положение винта.

В конструкции, изображённой на рис. 1а, применена коническая гайка с разрезом, которая при затягивании крепящего ее резьбового кольца деформируется, и выбирает зазор в паре винт-гайка, что позволяет уменьшить погрешность перемещения наконечника винта.

Задачи

- 1. Выявить контактные пары В соединении линзы С оправой, ограничивающие подвижность линзы. Определить класс. ИХ Проанализировать выполнение принципа статической определённости соединения (рис.1).
- 2. Указать элементы деталей, влияющие на точность центрировки линзы относительно баз А и Б оправы (рис.2.1).
- 3. Обосновать и проставить допуски на эскизах деталей узла крепления линзы (рис.1).
- 4. Выяснить причины деформации линзы при ее креплении и эксплуатации. Сравнить конструкции крепления линз для выявления решений, позволяющих уменьшить возможные деформации (рис.2.1).
- 5. Какие конструкции крепления линз (рис.2.1) позволяют проводить юстировку линз при сборке? Опишите процесс юстировки. Как повысить точность центрировки линзы?
- 6. Выявить зеркала контактные пары соединении оправой. В С Проанализировать выполнение принципов статической И геометрической определённости соединения. Сравнить конструкции, изображённые на рис. 2.2а и 2.2б по точности ориентации отражающей поверхности зеркала относительно поворота вокруг оси Х.

- 7. Указать элементы деталей, влияющие на точность расположения рабочего элемента зеркала относительно базового элемента оправы (рис. 2a и 2б).
- 8. Обосновать и проставить допуски на эскизах деталей узла крепления зеркала (рис. 2а и 2б).
- 9. На рис. 2.3 изображена схема конструкции крепления микрообъектива 1 в тубусе микроскопа 2. Выявить значение всех контактирующих поверхностей соединения. Проанализировать выполнение принципа статической определённости соединения. Предложить решения, обеспечивающие выполнение принципа статической определенности конструкции.
- 10. Обосновать и проставить допуски на эскизах деталей соединения корпуса микрообъектива 1 с тубусом 2 (рис. 2.3).

1.2 Погрешности конструкций функциональных устройств

В данном разделе анализируются конструктивные цепи, узлы и элементарные механизмы, в которых необходимо выявить погрешности и факторы, оказывающие влияние на их показатели качества.

Пример.

На рис. 1.2а приведена схема консольного крепления зеркала. Как требуется изменить конструкцию узла крепления зеркала, чтобы избежать расфокусировки изображения при поворотах зеркала?

В конструкции, изображённой на рис. 1.2а не выполняется принцип ограничения продольного и поперечного вылетов рабочих элементов. При повороте вала (консоли) из-за того, что плоскость отражающей поверхности не совпадает с осью вращения вала, будет происходить смещение отражающей поверхности в вертикальной плоскости. Поэтому, кроме требуемого поперечного смещения изображения в плоскости приемника, равного $\Delta y = 2l\Delta \varphi$, где *l* - расстояние от зеркала до приемника, будут иметь место такие нежелательные эффекты как:

1. Расфокусировка $\Delta f = 2\cos(\varepsilon)\Delta z$, где ε - угол падения светового пучка на зеркало, $\Delta z = (r+d)(1-\cos(\varphi))$ - перемещение зеркала в направлении нормали при его повороте (рис. 1.2б), *r* - расстояние от оси вращения вала до плоскости на которое базируется зеркало, *d* - толщина подложки зеркала;

2. Сдвиг изображения на приёмнике $\Delta = 2\sin(\varepsilon)\Delta z$;

3. Погрешность размера изображения на приемнике $\Delta y' = (4\cos(\varepsilon)y'/L)\Delta z$, где *L* - расстояние от выходного зрачка оптической системы до приемника.



Рис. 1.2 Консольное крепление поворотного зеркала: (а) - принцип ограничения поперечных вылетов детали не выполняется; (б) - определение величины поперечного вылета детали; (в) - отражающая поверхность совмещена с осью вращения - принцип ограничения вылетов выполняется.

Чтобы избежать указанных явлений, необходимо, чтобы r + d = 0. В этом случае, отражающая поверхность зеркала должна совпадать с осью вращения вала, как показано на рис. 1.2в.

Задачи

- 11. Указать погрешности элементов деталей узла крепления линз объектива, оказывающие влияние на величину комы и сферическую аберрацию объектива (рис. 2.4).
- 12. Сравнить конструкции крепления линз объективов по точности их центрировки относительно баз корпусных деталей (рис. 2.4). Как можно повысить точность центрировки?

- 13. Перечислить погрешности деталей объектива, влияющие на значение его фокусного расстояния и рабочий отрезок (рис. 2.4). Как обеспечить получение этих параметров равными их расчётному значению?
- 14. Произвести на качественном уровне сравнительный анализ трудоемкости изготовления сборки линз объектива (рис. 2.4) при различных способах их крепления.
- 15. Исследовать конструкцию винтового механизма на статическую определенность. Предложить изменения в конструкции для выполнения данного принципа (рис. 2.5).
- 16. Выявить первичные погрешности конструктивной цепи соединения шкалы с валом. Проставить допуски на рабочие и базовые элементы деталей (рис. 2.6).
- 17. На рис. 2.7 изображена схема параллелограмма, шарниры которого представляют собой кинематические пары пятого класса. Выполняется ли принцип статической определенности этого механизма? Предложите изменения в конструкции шарниров, позволяющие удовлетворить принцип статической неопределенности.
- 18. На рис. 2.8 изображены схемы червячной передачи (рис.8а) и передачи, состоящей из червяка и косозубого колеса (рис.8б). Выполнить анализ механизмов на соблюдение принципа статической определенности при условии, что опоры вращения червяка и колес представляют собой кинематические пары пятого класса.
- 19. На рис. 2.9 изображены конструкции узла лимба углоизмерительного прибора. Какая из конструкции менее трудоемка в сборке. Чем обусловлена децентрировка лимба относительно оси вращения. Каким способом можно достичь высокой точности центрировки лимба?
- 20. Выполнить структурный анализ стола перемещений отсчетной линейки, конструкция которого упрощенно изображена на рис. 2.10. Перечислить погрешности, приводящие к смещению рабочего элемента РЭ линейки вдоль осей Х и У при движении стола. Как можно разместить линейку с целью повышения точности перемещения РЭ.
- 21. Что произойдет со столом при его перемещении, если ось В (рис. 2.10) не будет параллельна в горизонтальной плоскости осям А и Б? Предложите решения, позволяющие избежать установленных Вами последствий.
- 22. Сравнить схемы направляющих, изображенных на рис. 2.10а и рис. 2.10б. Какая из них позволит получить более высокую точность формы поверхности? Связать соответствующие погрешности формы поверхности направляющих с погрешностью положения рабочего элемента РЭ линейки.
- 23. На рис. 2.11 изображена конструкция узла крепления зеркала, позволяющая производить его юстировку. Какие юстировочные

подвижки зеркала запроектированы и для чего? Где должен быть центр сферической головки винта? Расположите юстировочные винты так, чтобы повороты зеркала вокруг осей X и У были бы независимы.

24. Выполните структурный анализ юстировочного устройства конструкции (рис. 2.11). Какие недостатки конструкции Вы заметили? Предложите конструкцию более рациональную.

1.3 Теоретические погрешности преобразователей

Теоретическими называются погрешности, обусловленные отклонениями действительной функции преобразования от ее расчетного (теоретического) значения из-за допущений:

- В законе функционирования, например, при замене нелинейной функции приближенной линейной;
- В численных значениях конструктивных параметров, например при округлении параметров до ближайшего значения из ГОСТ;
- Ошибок при конструктивном выполнении схем с высшими кинематическими парами.

Пример.

На рис. 1.3а приведена схема клинового компенсатора с синусным механизмом, который предназначен для проведения высокоточных угловых измерений. Рассмотрим, что произойдет, если конструктор вместо синусного рычажного механизма использует в механизме компенсатора тангенсный рычажный механизм (рис. 1.3б). Конструктивные параметры клинового компенсатора: k = 1 - число заходов винта; t = 0.5 мм - шаг винта; R = 60 мм - длина плечей рычагов; n = 1.5 - показатель преломления материала клиньев; $\sigma = 1^{\circ}$ - угол клиньев; $\phi = \pm 10\pi$ - диапазон поворота винта.

В случае синусного рычажного механизма закон функционирования компенсатора имеет вид

$$\alpha = \frac{\sigma(n-1)kt}{R\pi}\varphi$$

При замене синусного рычажного механизма тангенсным, закон функционирования приобретает вид

$$\alpha = 2\sigma(n-1)\sin\left(\arctan\left(\frac{kt}{2\pi R}\varphi\right)\right),$$

в результате чего нарушается линейность работы компенсатора и появляется теоретическая погрешность, которая равна

$$\Delta \alpha = 2\sigma(n-1)\sin\left(\arctan\left(\frac{kt}{2\pi R}\varphi\right)\right) - \frac{\sigma(n-1)kt}{\pi R}\varphi.$$



Рис. 1.3 Клиновые компенсаторы с синусным рычажным механизмом (а) и тангенсным рычажным механизмом (б)

Чтобы получить формулу, связывающую угол поворота винта с погрешностью компенсатора, необходимо разложить функцию sin(arctg(x)) в степенной ряд. Ограничиваясь первыми тремя членами ряда, получаем

$$\sin\left(\operatorname{arctg}\left(\frac{kt}{2\pi R}\varphi\right)\right) = \frac{kt}{2\pi R}\varphi - \frac{k^3t^3\varphi^3}{16R^3\pi^3}$$

Подставляя полученное выражение в формулу для теоретической погрешности, получаем

$$\Delta \alpha = -\frac{\sigma(n-1)k^3t^3\varphi^3}{8R^3\pi^3} = 0.6 \times 10^{-6}$$
рад. или 0.12".

Задачи

- 25. Ha 2.12 представлена рис. автоколлиматора схема С автоколлимационным окуляром Аббе. Найти выражение для теоретической погрешности определения угла поворота зеркала Х по шкале сетки при условии, что шкала линейна. Какие параметры необходимо изменить в схеме, чтобы уменьшить теоретическую погрешность $\Delta Y_{T}?$
- 26. На рис. 2.13 изображена схема автоколлиматора с зеркальным умножителем. Найти погрешность измерения угла поворота зеркала вокруг оси X из-за допущения линейности зависимости между перемещением изображения автоколлимационной марки по сетке

автоколлиматора и углом Х.

- 27. На рис. 2.14 схематично изображена конструкция рычажного механизма, предназначенного для линейного преобразования движения с передаточным отношением равным единице. Найти теоретическую погрешность механизма. Внести изменения в конструкцию с целью устранения теоретической погрешности.
- 28. На рис. 2.15а и 2.15б схематично изображены конструкции рычажных передач. Найти теоретические погрешности этих механизмов при условии, что требуется линейное преобразование движения.
- 29. На рис. 2.16 изображена схема механизма тонкой фокусировки микроскопа (типа Мейера). Вывести выражение для теоретичекой погрешности механизма, допуская, что функция, связывающая Х и У, линейна.
- 30. Может ли возникнуть теоретическая погрешность из-за того, что конец толкателя, опирающегося на кулачок, выполнен в виде сферы с радиусом r? Если она возможна, то какие необходимы изменения для устранения этой погрешности (рис. 2.17).
- 31. Ha рис. 2.18 изображена схема оптического микрометра С плоско-параллельной пластинкой. Найти теоретическую погрешность точной функции преобразования приближенной из-за замены (линейной).
- 32. Выяснить наличие теоретической погрешности механизма тонкой наводки микроскопа типа Бауш и Ломб из-за округления при определении его параметров (рис. 2.19).
- 33. Найти величину теоретической погрешности устройства для измерения линейных перемещений, состоящего из реечной передачи 1-2 и импульсного фотоэлектрического преобразователя 3 (рис. 2.20). Параметры элементов устройства: число зубьев триба - 16; модуль зацепления 2 мм; число импульсов преобразователя - 10 000 на 1 оборот триба; диапазон измерения - 200 мм.

1.4 Скалярные погрешности

В разделе определяются частичные погрешности данном обусловленные скалярными первичными функциональных устройств, Скалярная погрешность погрешностями. характеризуется только значением величины, направление отсчета которой вполне определено. Это погрешности размеров деталей, деформаций от сил тяжести, температурные изменения размеров, погрешности наведения, квантования и пр.

Пример.

На рис. 1.3а приведена схема клинового компенсатора с синусным рычажным механизмом. Требуется оценить влияние на погрешность функционирования компенсатора следующих первичных погрешностей:

а) погрешностей изготовления углов клиньев ($\Delta \sigma = 1'$);

б) отклонения показателя преломления материала клиньев ($\Delta n = 1 \times 10^{-4}$);

в) погрешностей длин плеч рычагов ($\Delta R = 0.05$ мм).

Частичные погрешности отклонения светового луча компенсатором могут быть получены путём дифференцирования закона функционирования компенсатора по параметрам, имеющим соответствующую погрешность:

$$\Delta \alpha_{\Delta \sigma} = \frac{d \alpha}{d \sigma} \Delta \sigma = \frac{(n-1)kt\varphi}{R\pi} \Delta \sigma = 12.5 \times 10^{-6} \text{ рад;}$$
$$\Delta \alpha_{\Delta n} = \frac{d \alpha}{dn} \Delta n = \frac{\sigma kt\varphi}{R\pi} \Delta n = 0.75 \times 10^{-6} \text{ рад;}$$
$$\Delta \alpha_{\Delta R} = \frac{d \alpha}{dR} \Delta R = -\frac{\sigma (n-1)kt\varphi}{R^2 \pi} \Delta R = 0.62 \times 10^{-6} \text{ рад.}$$

С учетом того, что механизм имеет по два одинаковых клина и рычажных механизма, а их первичные погрешности можно считать случайными и одинаково влияющими на погрешность функционирования механизма

$$\begin{split} \Delta \alpha_{\Delta\sigma\Sigma} &= \sqrt{\Delta \alpha_{\Delta\sigma}^2 + \Delta \alpha_{\Delta\sigma}^2} = \sqrt{2} \,\Delta \alpha_{\Delta\sigma} = 17.7 \times 10^{-6} \text{ pag.}, \\ \Delta \alpha_{\Delta n\Sigma} &= \sqrt{\Delta \alpha_{\Delta n}^2 + \Delta \alpha_{\Delta n}^2} = \sqrt{2} \,\Delta \alpha_{\Delta n} = 1 \times 10^{-6} \text{ pag.}, \\ \Delta \alpha_{\Delta R\Sigma} &= \sqrt{\Delta \alpha_{\Delta R}^2 + \Delta \alpha_{\Delta R}^2} = \sqrt{2} \,\Delta \alpha_{\Delta R} = 0.9 \times 10^{-6} \text{ pag.}. \end{split}$$

Задачи

- 34. Найти погрешность функционирования оптического микрометра (рис. 2.18) из-за погрешности:
 - a) показателя преломления материала пластинки Δn ;
 - б) толщины пластинки Δd ;
 - в)длины рычага ∆r.
- 35. Найти предельное вероятное значение (доверительная вероятность 0.95) погрешности фокусного расстояния склеенного объектива (рис. 2.21) из-за:

a) отклонения от расчетного показателя преломления Δn на величину $\pm 5 \times 10^{-4}$;

б) погрешностей изготовления радиусов кривизны поверхностей линз

(N = 3);

- в) погрешность толщин линз $\Delta d_{1,2} = \pm 0.1$ мм;
- г) суммарного действия перечисленных выше погрешностей.
- 36. Найти погрешность измерения угла поворота зеркала автоколлиматора (рис. 2.12) из-за погрешности $\Delta f'$ фокусного расстояния объектива. Рассчитать предельный допуск на погрешность фокусного расстояния $\Delta x = 5$ ", x = 30', f' = 500 мм. Можно ли при условии, что технологически обеспечить данный отпуск что И следует конструкции предусмотреть В схеме И автоколлиматора для обеспечения требуемой точности работы при невозможности его выполнения?
- 37. Найти зависимость для погрешности отклонения луча (рис. 2.17) из-за:
 - а) погрешности межосевого расстояния;
 - б) погрешности деления шкалы;
 - в) погрешности профиля кулачка.
- 38. Найти погрешность функционирования устройства отклонения луча (рис. 2.22) из-за:
 - а) погрешности шага винтового механизма;
 - б) погрешности фокусного расстояния подвижной линзы;
 - в) погрешностей длин плеч рычагов;
 - г) погрешности деления шкалы;
 - д) погрешности формы торцевой площадки винты.
- 39. Найти погрешность измерения положения штриха контролируемой шкалы отсчетным микроскопом, имеющим спиральный окулярный микрометр (рис. 2.23) из-за:
 - а) погрешности радиуса вектора спирали измерительной сетки;
 - б) погрешности деления штрихов точной шкалы сетки;
 - в) погрешности увеличения объектива.
- 40. На рис. 2.24 изображена конструкция опоры горизонтальной оси качания визирной трубы. Найти смещение оси качания из-за погрешности ее диаметра и угла призмы. Предложите конструкцию призматической опоры с регулировкой положения оси качания.
- 41. На рис. 2.25 представлено два варианта кинематической схемы отсчетного привода стола с дифракционной решеткой. Как влияют кинематические погрешности зубчатых, червячных колес и червяка на точность поворота решетки? Какая схема позволяет обеспечить более высокую точность работы при условии, что схемные параметры и погрешности элементов передач одинаковы?

1.5 Векторные погрешности

Векторные погрешности характеризуются и значением величины, и направлением своего действия. Как правило, они имеют неопределенное и заранее неизвестное направление. К таким погрешностям относятся эксцентриситеты и перекосы деталей, несоосности элементов, клиновидности и т.п.

Пример.

На рис. 1.4 приведена функциональная схема индикаторной головки часового типа, которая имеет следующие конструктивные параметры: число зубьев колес $z_1 = 16$, $z_2 = 100$, $z_3 = 10$, модуль зацепления m = 0.2, число делений шкалы $N_{uu} = 100$, диапазон измерения X = 10 мм (10 оборотов стрелки). Оценить погрешность измерения, обусловленную эксцентриситетом зубчатых колес индикатора $\Delta e = 5$ мкм.



Рис. 1.4. Функциональная схема измерительной головки часового типа

Закон функционирования индикатора имеет вид $Y = A \frac{N_{ul} z_2}{\pi m z_1 z_3} X$.

Эксцентриситет зубчатых колес приводит к погрешности их поворота $\Delta \varphi_i = \sin(\alpha + \varphi + \theta) \Delta e_i / \cos(\alpha) r_i$ где φ - угол поворота зубчатого колеса, Δe - эксцентриситет зубчатого колеса, $\alpha = 20$ град. - угол зацепления зубчатых колес, r = mz/2 - радиус делительной окружности зубчатого колеса.

Частичные погрешности, обусловленные эксцентриситетами зубчатых колес можно вычислить по формулам:

$$\Delta Y_1 = A \frac{N_{ul} z_2}{\pi z_3} \Delta \varphi_1,$$

$$\Delta Y_2 = A \frac{N_{uu} z_2}{\pi z_3} \Delta \varphi_2,$$

$$\Delta Y_3 = A \frac{N_{uu}}{\pi} \Delta \varphi_3.$$

Угол поворота зубчатого колеса φ можно вычислить из формул $\varphi_1 = \varphi_2 = 2 X / m z_1$, $\varphi_3 = 2 X z_2 / m z_1 z_3$. Для расчета предельной погрешности можно задать $\sin(\alpha + \varphi + \theta) = 1$ и тогда $\Delta \varphi = \Delta e / \cos(\alpha) r$. Подставляя рассчитанные по упрощенной формуле ошибки угла поворота в формулы для частичной погрешности, получаем $\Delta Y_1 = 10$ мкм, $\Delta Y_2 = 1.7$ мкм, $\Delta Y_3 = 1.7$ мкм. Складывая частичные погрешности как случайные величины, получаем $\Delta Y = \sqrt{\sum \Delta Y_i^2} = 10.3$ мкм.

Задачи

- 42. Выявить векторные первичные погрешности деталей сборочной единицы (рис. 2.1) и определить вызванную ими децентрировку линзы относительно баз А и Б оправы.
- 43. Найти погрешность функционирования устройства (рис. 2.17) из-за:
 а) эксцентриситета кулачка;
 б) эксцентриситета шкалы.
- 44. Найти вызванную эксцентриситетом триба погрешность измерения перемещения устройством (рис. 2.20), имеющим следующие параметры: число зубьев триба 16; модуль зацепления 2 мм; число импульсов преобразователя 10 000 на 1 оборот триба; диапазон измерения 200 мм.
- 45. Найти погрешность отклонения луча в устройстве (рис. 2.22) из-за:
 - а) перекоса опорного торца шкалы;
 - б) перекоса торцевой площадки винта;
 - в) эксцентриситета шкалы;
 - г) наклона площадки
- 46. Как влияют на точность работы окулярного микрометра (рис. 2.23)
 а) эксцентриситет сетки со спиральной шкалой;
 б) клиновидность сетки.
- 47. На рис. 2.26 изображена схема призменного бинокля. Одним из основных требований, предъявляемых к нему, является параллельность пучков лучей, выходящих из окуляров. Перечислите погрешности изготовления и сборки элементов бинокля, влияющие на непараллельность пучков лучей:
 - а) в вертикальной плоскости;

б) в горизонтальной плоскости;

в) найдите непараллельность пучков лучей из-за децентрировки объективов и окуляров;

г) найдите непараллельность пучков лучей из-за смещения призмы П₁ вдоль оси У;

д) найдите непараллельность пучков лучей из-за поворота призмы П₁ вокруг оси У.

48. Найти допуск на радиальное биение внутренних колец шарикоподшипников углоизмерительной головки (рис. 2.27), исходя из:
а) условия обеспечения резкого видения штрихов лимба в отсчетном микроскопе (объектив микроскопа имеет увеличение 40 крат и апертуру 0.65, окуляр микроскопа имеет увеличение 10 крат);

б) требований точности - допустимая погрешность измерения угла поворота вала из-за биения в подшипниках не должна превышать 10" (радиус лимба - 45 мм).

1.6 Зазоры в кинематических парах

Зазоры, возникающие при сопряжении оптических и механических деталей, приводят к смещениям деталей под действием сил. Для определения погрешностей от смещений в зазорах рекомендуется предварительно найти направление сил, действующих на подвижный элемент.

Пример.

На рис.4 изображена функциональная схема механизма индикаторной головки часового типа со следующими параметрами:диапазон измерения X = 10 мм, цена деления шкалы 0.01 мм. Измерительный шток индикатора установлен в подшипниках, расстояние между которыми (база) равно 56 мм, посадка штока в подшипник выполнена по посадке H7/f7, диаметр штока равен 5мм.Требуется оценить погрешность измерения размера объектов, вызванную перекосом измерительного штока в зазоре.





Рис. 5 Угловое смещение измерительного штока при наличии зазора в направляющих (а) и возникающая вследствие этого косинусная погрешность измерения размера объекта.

Сначала оценим максимальное значение зазора по формуле $\Delta C = |\Delta_1| + |\Delta_2| + \sqrt{q_1^2 + q_2^2} = 6 \times 10^{-3} + 16 \times 10^{-3} + 8.4 \times 10^{-3} = 30.4 \times 10^{-3}$ MM, где $\Delta_1 = 6$ мкм, $\Delta_2 = 16$ мкм - смещение центра поля допуска относительно номинального размера, $q_1 = q_2 = 6$ мкм - половина поля допуска. Перекос измерительного штока зазоре будет равен В $\gamma = \Delta C / B = 30.4 \times 10^{-3} / 56 = 0.54 \times 10^{-3}$ (рис.5а). Тогла ошибка перемещения штока, в соответствии со схемой, изображенной на рис. 5б, будет равна

$$\Delta X = X(1/\cos(\gamma) - 1) = X\left(\frac{1 - \cos(\gamma)}{\cos(\gamma)}\right) = \frac{2X\sin^2(\gamma/2)}{\cos(\gamma)} \approx X\gamma^2/2 = 2.9 \times 10^{-6} \text{ MM},$$

что говорит о том, что перекос в направляющих измерительного штока практически не влияет на точность работы индикаторной головки.

Задачи

- 49. На рис. 2.28 схематично изображена конструкция подвижной сетки окулярного микрометра. Как влияет зазор в направляющих на погрешность работы микрометра? Предложите изменения в конструкции для уменьшения или устранения влияния зазора.
- 50. Найти погрешность отклонения луча (рис. 2.22) из-за зазора в винтовом соединении. Измените конструкцию винтового механизма для уменьшения или изменения зазора.
- 51. Найти погрешность поворота дифракционной решетки из-за боковых зазоров зубчатой и червячной передач привода (рис. 2.25). Как можно устранить зазоры или их влияние?
- 52. Найти погрешность отклонения луча (рис. 2.17) из-за зазора в направляющих толкателя кулачкового механизма.

- 53. Как вляет зазор в опоре кулачка (рис.2.17) на погрешность отклонения визирного луча?
- 54. Чему равен мертвый ход триба и погрешность измерения перемещения рейки из-за бокового зазора в паре триб-рейка (рис. 2.20)?
- 55. Найти погрешность функционирования оптического микрометра (рис. 2.18) из-за зазора:
 - а) в винтовой паре;
 - б) в опоре вращения плоскопараллельной пластины.
- 56. В устройствах позиционирования оптических приборов часто применяются двухплечие рычажные механизмы, например, в тонкой наводке микроскопа на резкость типа «Винкель и Лейтц», в наводящих компенсаторе устройствах теодолитов, ЛИНЗОВОМ оптического дальномера (рис. 2.22). Как влияет на качество работы этих устройств опоре вращения рычага? Предложите конструкцию зазор В цилиндрической опоры с устойчивым положением цапфы.

1.7 Эксплуатационные погрешности

К эксплуатационным погрешностям относятся погрешности, обусловленные влиянием нагрузок, сил трения, изменения температуры, вибрации и т.п. Задачи этого раздела посвящены, главным образом, определению частичных погрешностей из-за деформации и сил трения.

Пример.



Рис. 1.6 Фрагмент сферометра.

На рис. 1.6 приведен фрагмент сферометра, изображающий область контакта опорных шариков с контролируемой линзой 3. Под действием массы линзы в точках контакта происходит деформация линзы, приводящая к погрешности измерения стрелки прогиба линзы, и, следовательно, к погрешности радиуса измерения линзы. Определить погрешность измерения радиуса поверхности линзы R = 100 мм, вызванную ее деформацией, если масса линзы 0.1 кг, радиус опорных шариков r = 2 мм, диаметр опорного кольца 2 D = 15 мм, материал линзы - стекло K8, материал опорных шариков - сталь 40Х.

Величина контактной деформации находится по формулам Герца. При контакте двух сферических поверхностей деформация равна $\Delta f = 0.8255 \sqrt[3]{N^2((R+r)/Rr)\left(\frac{1-\mu_{uu}^2}{E_{uu}} + \frac{1-\mu_{\pi}^2}{E_{\pi}}\right)}, \ \text{где} \quad N = (P-Q)/3\cos(\alpha) - \frac{1-\mu_{\mu}^2}{E_{\mu}} + \frac{1-\mu_{\pi}^2}{E_{\pi}}\right)$

сила нормального давления на опору, Р - вес линзы, Q -мерительное усилие пиноли, α - угол давления, Е - модули Юнга материалов опорных шариков и линзы, μ - коэффициент Пуассона материалов опорных шариков и линзы. В нашем случае P = 1 H, Q = 0.5 H, $\mu_{uu} = 0.3$, $\mu_{\pi} = 0.206$, $E_{uu} = 206 \times 10^3$ H/mm², $E_{\pi} = 82 \times 10^3$ H/mm², $\cos(\alpha) \approx \sqrt{1 - D^2/4(R - r)^2}$. При таких условиях деформация линзы $\Delta = 0.13$ мкм. Так как деформация линзы приводит к погрешности положения штока 1 $\Delta f = \Delta y$, то погрешность измерения радиуса кривизны линзы может быть найдена из выражения $\Delta R = \left(-\frac{D^2}{8y^2} + \frac{1}{2}\right)\Delta y = -0.048$ мм, где y = 0.276 мм - стрелка прогиба измеряемой поверхности (для того, чтобы получить данную формулу

можно воспользоваться формулой сферометра $R = \frac{D^2}{8y} + \frac{y}{2} + r$)

Задачи

- 57. Найти погрешность перемещения сетки окулярного микрометра (рис. 2.28) из-за изменения контактной деформации пары винт-ползун при условии, что винт и ползун выполнены из стали, радиус конца винта 2 мм, максимальное и минимальное усилие пружины 1.5 и 1 H, вес ползуна с сеткой - 50 г.
- 58. Найти погрешность отклонения луча (рис. 2.22) из-за:
 - а) Изменения контактных деформаций в высших кинематических парах (в точках контакта плеч рычага с ползуном и винтом);
 б) Изгиб плеча рычага.
- 59. Найти упругий мертвый ход параллелограмма (рис. 2.7) из-за

деформаций его звеньев при условии, что момент сопротивления движению меняет знак при реверсе движения.

- 60. Найти угол закручивания стального вала лимба углоизмерительного прибора (рис. 2.29) и его влияние на точность измерения угла поворота вала. Диаметр вала 10 мм, момент сопротивления вращению 10 Н см.
- 61. Найти отклонение фокусного расстояния объектива (рис. 2.21) от его номинального значения при отклонении температуры окружающей среды до +40 С° от номинальной.
- 57. Найти величины расфокусировки изображения, создаваемого зеркалом телескопа при отклонении температуры от номинальной от +20 C° до -40 C°. Зеркало выполнено из стекла пирекс с коэффициентом теплового расширения α = 3 × 10⁻⁶ 1/град., фокусное расстояние объектива 2 метра.
- 58. Проверить возможность деформации линзы объектива в оправе при изменении температуры окружающей среды от +20 C° до -60 C° (рис. 2.31), если линза выполнена:

а) из фтористого кальция $\alpha = 19.5 \times 10^{-6}$ 1/град., а оправа - из сплава Д16 $\alpha = 22 \times 10^{-6}$ 1/град.;

б) из кварца $\alpha = 2 \times 10^{-7}$ 1/град., а оправа - из титана с $\alpha = 8 \times 10^{-6}$ 1/град.

- 59. Проверить возможность температурного заклинивания цилиндрической опоры вращения рычага (рис. 2.22) при условии что вал диаметром 5 мм выполнен из стали $\alpha = 11.5 \times 10^{-6}$ 1/град., подшипник из бронзы $\alpha = 17.5 \times 10^{-6}$ 1/град., посадка вала в подшипник Н9/f9. Отклонение температуры от номинальной равно ±40 С°.
- 60. При какой температуре произойдёт заклинивание направляющих типа «ласточкин хвост» (рис. 2.5) при условии, что ползун сделан из стали с α = 11.5×10⁻⁶ 1/град., направляющие - из латуни с α = 18×10⁻⁶ 1/град., минимальный зазор в посадке - 10 мкм, ширина ползуна - 100 мм.
- 61. Как влияет сила трения между концом щупа и кулачком (рис. 2.17) на точность отклонения визирного луча?
- 62. Как найти силу трения в направляющих типа «ласточкин хвост» ползуна сетки окулярного микрометра (рис. 2.28)? Как влияет сила трения на точнсоть функционирования микрометра?

1.8 Погрешности наведения и считывания

Эти погрешности оказывают существенное влияние на точность

функционирования геодезических приборов, автоколлиматоров, измерительных микроскопов и других приборов, работа которых основана на совмещении изображения, создаваемого оптической системой, с маркой сетки. Погрешности совмещения (наведения) обусловлены ограниченной остротой зрения оператора и параллаксом между изображением и маркой. Эти же факторы обуславливают и погрешности считывания.

Пример.

Требуется оценить погрешность измерения отклонения размера объекта. вызванную погрешностью считывания отсчета ПО шкале окулярного оптиметра (рис. 1.7) и параллаксом, если цена деления шкалы оптиметра n = 1 мкм, измеряемое отклонение размера объекта x = 100 мкм, фокусное расстояние объектива оптиметра $f'_{ob} = 200$ мм, длина плеча рычага оптиметра r = 5 мм, видимое увеличение окуляра $\Gamma = 10$, диаметр выходного зрачка оптиметра $D_{6bx} = 5$ мм, параллакс $\Delta t = 100$ мкм.



Рис. 1.7 Функциональная схема окулярного оптиметра: 1-объект измерения, 2-измерительный шток, 3 - поворотное зеркало, 4-объектив, 5-призма, 6 - сетка, 7, 8, 9 - элементы осветительной системы, 10-окуляр, 11-измерительная марка.

При условии, что измерения выполняются опытным оператором, можно считать, что погрешность считывания в этом случае равна 1/5 цене деления шкалы оптиметра $\Delta n = \pm 0.2$ мкм. Так как оптиметр предназначен для относительных измерений, то для измерения величины х необходимо

проведение двух измерений. Так как погрешности считывания для этих измерений носят случайный характер и можно считать, что они имеют одинаковые поля рассеяния, то $\Delta x_{\Delta n} = \sqrt{\Delta n 1 + \Delta n 2} \approx \pm 0.3$ мкм.



Рис. 1.8 Возникновение параллакса при несовпадении плоскостей сетки и изображения измерительной марки.

Для расчета влияния параллакса на точность измерения воспользуемся схемой, изображенной на рис. 1.8. Возможное смещение глаза в пределах выходного зрачка оптиметра $\Delta d = \pm (D_{BbIX}/2 - d_{2\pi}/2) = \pm (5/2 - 2/2) = \pm 1.5$ мм. Расстояние от сетки до окуляра равно $f'_{o\kappa} = 250/\Gamma = 25$ мм. Тогда погрешность положения изображения марки в плоскости шкалы из-за смещения глаза равна $\Delta x' = \Delta t \Delta d / f'_{o\kappa} = \pm 6$ мкм. Переводя эту погрешность на вход оптиметра с помощью закона функционирования оптиметра $x' \approx 2 f'_{o\delta} x/r$, получаем погрешность снятия измерения из-за параллакса $\Delta x_{\Delta t} = r \Delta x'/2 f'_{o\delta} = \pm 0.075$ мкм.

Отдельным вопросом является расчет погрешности считывания координат измерительной марки при использовании матричного приемника. В этом случае погрешность считывания определяется в основном двумя факторами: шумами фотоприемника и погрешностью интерполяции, обусловленной дискретностью приемника. Если заранее известны отношение сигнал-шум $\mu = N_c / N_u$ и размер изображения на

приемнике, то можно воспользоваться формулой $\Delta x' = \left(\sum_{i=1}^{m} x'_i - b\right) / (m \mu)$,

где *m* - число освещенных пикселей фотоприемника, *b* - размер пиксела, x' - координаты центров освещенных пикселов. Так, при $\mu = 100$, b = 3 мкм и m = 20 погрешность измерения сдвига марки составит 0.3 мкм.

В случае, когда размеры марки и точное отношение сигнал шум неизвестны, можно воспользоваться формулой

 $\Delta x' = 2b \sqrt{\sigma_{cm}^2 + \sigma_{A \downarrow I \Pi}^2 + \sigma_{cm}^2} / \sqrt{3}$, где σ_{cm} - относительное значение шума обусловленного процессами генерации зарядов в фоточувствительном слое (оценивается через динамический диапазон приемника и не должен превышать его нижнюю границу $\sigma_{cm} \approx 0.005$ от максимального значения сигнала), $\sigma_{A \downarrow I \Pi}$ - относительное значение шума АЦП (порядка 0.01 от максимального значения сигнала), σ_{cm} - относительное значение шума АЦП (порядка 0.01 от максимального значения сигнала), σ_{cm} - относительное значение сигнала). Подставляя указанные значения в формулу, получаем 0.25 мкм.

Погрешность интерполяции обусловлена дискретным представлением сигнала и зависит от используемого способа обработки изображения. Если центр изображения определяется по максимальному (минимальному) значению сигнала, то предельное значение этой погрешности равно половине размера пиксела $\Delta x' = \pm b/2$. При использовании таких методов цифровой обработки как поиск центра тяжести изображения или метод наименьших квадратов она может быть уменьшена до 0.05 - 0.1 размера пиксела.

Задачи

- 68. Найти погрешность измерения расстояния между двумя штрихами шкалы, поверяемой на горизонтальном компараторе, из-за параллакса в отсчетном микроскопе (рис. 2.23). Максимальное несовпадение плоскости изображения с плоскостью марки подвижной сетки спирального окулярного микрометра может достигать глубины резкости окуляра. Увеличение окуляра - 12.8 крат, микрообъектива -5×0.15.
- 69. Найти погрешность измерения расстояния между двумя штрихами шкалы, поверяемой на горизонтальном компараторе, из-за погрешности совмещения изображения штрихов с би-спиралью окулярного микрометра, обусловленной ограниченной остротой зрения оператора (рис. 2.23). Увеличение окуляра 12.8 крат, микрообъектива 5×0.15.
- 70. Как влияет параллакс между автоколлимационным изображением марки и штрихами сетки автоколлиматора (рис. 2.12) на точность измерения угла поворота зеркала? Фокусное расстояние объектива автоколлиматора - 200 мм, увеличение окуляра - 10 крат, диаметр входного зрачка автоколлиматора - 20 мм.
- 71. Перемещение стола универсального измерительного микросокопа УИМ-23 измеряется с помощью отсчетной проекционной системы

наведения би-штриха шкалы, установленной на столе (упрощённая схема отсчетного устройства изображена на рис. 2.32). Найти погрешность измерений из-за неточности совмещения штриха с би-штрихом. Увеличение проекционной системы 60 крат.

- 72. Выведите формулы для определения погрешностей измерения углов автоколлиматором и теодолитом из-за погрешности поперечных наводок (погрешности совмещения изображения с маркой сетки). Дайте рекомендации по уменьшению погрешности функционирования этих приборов из-за указанной причины.
- 73. Найти погрешность отклонения луча из-за неточности совмещения штриха шкалы с индексом (рис. 2.17).
- 74. Найти влияние погрешности снятия отсчетов по шкале на точность измерения:
 - а) автоколлиматора (рис. 2.13);
 - б) отсчетного микроскопа (рис. 2.23);
 - в) винтового окулярного микрометра (рис. 2.28).

Какие факторы влияют на погрешность снятия отсчетов? Как уменьшить эту погрешность?

1.9 Компенсация погрешностей

погрешностей осуществляется Компенсация конструктивными (регулировочными коррекционными устройствами), методами И технологическими методами (дополнительная обработка деталей в процессе сборки) и организационно-техническими методами (селекция деталей, введение поправок, организация специальных приемов работы и посвящены расчету т.п.). Залачи данного раздела параметров конструктивных компенсаторов.

Пример.

На рис. 1.9 изображена функциональная схема линзового компенсатора, применяемого для измерения параллактического угла в оптическом дальномере. Так как линзы и винт имеют погрешности фокусного расстояния и шага винта, сильно влияющие на точность измерения параллактического угла, то для компенсации этих погрешностей используют наклон винтового механизма относительно направляющих, в которых одна из линз перемещается относительно другой. Оценим величину требуемого наклона винтового механизма α , если фокусные расстояния линз $f'_1 = f_2 = 500$ мм, число заходов резьбы винта k = 1, шаг резьбы винта p = 0.5 мм, угол отклонения лучей компенсатором $\gamma = \pm 10'$, погрешность фокусного расстояния $\Delta f'_1 = \Delta f'_2 = 1\%$, $\Delta p = 5$ мкм.



Рис. 1.9 Схема компенсации погрешности шага винта и фокусного расстояния линз линзового компенсатора

Закон функционирования такого компенсатора описывается выражением $\gamma = \frac{k p}{f' 2 \pi} \varphi$, где φ - угол поворота маховичка винта. При наклоне винта ошибка перемещения его наконечника будет, описываться выражением $\Delta y = \frac{k p \varphi}{2 \pi} (1 - \cos(\alpha))$ и коррекционное воздействие на измеряемый параллактический угол составит $\Delta \gamma_{\kappa} = \frac{k p \varphi}{f' 2 \pi} (1 - \cos(\alpha)) = \gamma (1 - \cos(\alpha)).$

Частичные погрешности измерения параллактического угла могут быть получены дифференцированием закона функционирования по каждой из первичных погрешностей, тогда суммарная погрешность измерения составит $\Delta \gamma = 2\gamma \Delta f' / f' + \gamma \Delta p / p = \gamma (2\Delta f' / f' + \Delta p / p)$. Так как $\Delta \gamma - \Delta \gamma_{\kappa} = 0$, то угол установки винтового механизма может быть рассчитан из выражения $\operatorname{arccos}(1 - 2\Delta f' / f - \Delta p / p) = \alpha \approx 15^{\circ}$.

Задачи

77. В механизме тонкой фокусировки микроскопа (рис. 2.16)теоретическая погрешность из-за допущения линейной функции, связывающей Х и У, компенсируется изменением длины рычага г. Как найти значение изменения длины рычага ∆ г необходимое для такой коррекции? Можно ли таким способом компенсации полностью устранить влияние теоретической погрешности?

78. На рис. 2.33 и 2.34 изображены схемы двухплечих рычажных механизмов и графики погрешностей перемещения ведомых звеньев. Предложите конструктивные способы компенсации этих погрешностей, сделайте эскизы конструкций компенсаторов и рассчитайте необходимое значение коррекции:

а) для механизма на рис. 2.33;

б) для механизма для рис. 2.34.

- 79. Для компенсации возможных деформаций и смещения линзы в оправе при изменении температуры в случае, когда коэффициенты линейного расширения линзы (α_л) и оправы (α₀) различны, между оправой и линзой установлены термокомпенсационные вкладыши (рис. 2.35). Выведите формулу, позволяющую рассчитать необходимый размер вкладыша (либо необходимый коэффициент расширения его материала α_к) для осуществления термокомпенсации.
- 80. Для компенсации расфокусировки изображения, создаваемого зеркалом 1 телескопа, на фотоприемнике 2, между зеркалом и фотоприемником установлены два кольца, выполненные из стали 3 и инвара 4 (рис. 2.36). Рассчитайте необходимую ширину стального и инварного колец. Коэффициенты линейного расширения: стали α_c = 11.8×10⁻⁶ 1/град., инвара α_и = 1.6×10⁻⁶ 1/град., стекла (пирекс) α_п = 3.3×10⁻⁶ 1/град., радиус кривизны зеркала r = 4200 мм.
- 81. На рис. 2.37 изображена схема коррекционного устройства червячной передачи, предназначенного для компенсации влияния эксцентриситета червячного колеса. Коррекционный поворот колеса 2 осуществляется осевым смещением червяка 1 с помощью двухплечего рычага и регулируемого эксцентрика 3, установленного на оси вращения колеса. Выведите выражение, связывающее параметры коррекционного устройства с углом поворота червячного колеса.
- 82. Рассчитайте угол наклона коррекционной линейки γ винтового механизма при условии, что требуется компенсировать накопленную погрешность перемещения гайки (рис. 2.38). Число заходов винта k=2, шаг резьбы 0.5 мм, радиус рычага R = 25 мм, перемещение гайки 20 мм, накопленная погрешность 10 мкм.

1.10 Погрешность позиционирования элементов

Процесс позиционирования заключается в приведении некоторых рабочих элементов устройств в заданное положение.

Для ОП характерна высокая точность позиционирования, для чего необходимо осуществление малых смещений этих элементов при выполнении регулировочно-юстировочных операций и наведения прибора на объект наблюдения.

Погрешность функционирования зависит от: размеров и форм органов ручного управления (маховичков, рукояток, отверток и т.п.); моментов и движению (эти факторы определяют сил сопротивления порог чувствительности движения органов управления - минимально возможное органа управления); передаточного отношения привода смещение (жёсткости, управления; качества привода управления плавности движения, величины и характера кинематических погрешностей и др.); точности и вида контроля за результатом позиционирования и т.д.

Пример.

На рис. 1.10 объектив телескопической системы проецирует изображение объекта на сетку. Какую чувствительность перемещения должен иметь механизм перемещения объектива, для того, чтобы оператор мог одновременно наблюдать резкое изображение как штрихов сетки, так и объекта. Фокусное расстояние объектива $f'_{of} = 100$ мм, диаметр входного зрачка телескопической системы $D_{ex} = 30$ мм, $f'_{ox} = 10$ мм.



Рис. 1.10 Телескопическая система

Оценим геометрическую глубину резкости объектива по формуле $t = \pm \frac{f'_{OK} \varepsilon_{2R} 3 \times 10^{-4}}{2 A'_{OG}}$, где $\varepsilon_{2R} = 1'$ - разрешающая способность глаза, $A' = D_{6x}/2 f'_{OG}$ - задняя апертура объектива. Подставляя имеющиеся параметры телескопической системы в формулу, получаем геометрическую глубину резкости $t = \pm 100$ мкм. Чтобы обеспечить такую погрешность совмещения фокальной плоскости объектива с плоскостью сетки, необходимо чтобы чувствительность механизма перемещения объектива была не больше $\delta t = |t|/5 = 20$ мкм. Если для перемещения

объектива используется резьба с шагом p=1 мм, то при минимально возможном от руки повороте оправы на угол $\varphi \approx 2^{\circ}$, перемещение объектива составит $\delta t = p \varphi / 360^{\circ} = 5.5$ мкм, чего достаточно для фокусировки изображения. Примеры механизмов, выполняющих такую фокусировку, приведены на рис. 1.11.



Рис. 1.11. Примеры механизмов фокусировки объективов телескопических систем: фокусировка с помощью промежуточного кольца (а); фокусировка по резьбе (б)



Рис. 1.12 Определение допуска на установку матричного приемника

В случае замены окуляра и сетки на ПЗС приемник допуск на установку приемника можно определить исходя из геометрической глубины резкости. Если размер изображения точки на фотоприемнике при расфокусировке не превышает размера пиксела, то такое изображение будет восприниматься как точка. Тогда допуск на установку приемника равен $t = \pm b/2 A'$ (рис. 1.12). При b = 1.8 мкм и A' = 0.1 допуск составит \pm 9 мкм. Если воспользоваться для расчета допуска формулой для дифракционной глубины резкости, то получим значение $t = \overline{\lambda}/2 A'^2 = 27.5$ мкм. При таком значении допуска изображение точки займёт несколько пикселов приемника.

Задачи

83. Оцените минимальное отклонение и смещение луча при выполнении юстировочных подвижек зеркала с помощью соответствующих винтов

(рис. 2.11).

- 84. С какой погрешностью нужно регулировать воздушный промежуток между положительным и отрицательным компонентом телеобъектива (рис. 2.39), чтобы его фокусное расстояние изменилось на 0.1%? Предложите конструкцию регулировочного устройства.
- 85. С какой погрешностью можно разворачивать сетку с би-штрихом автоколлиматора (рис. 2.13), чтобы автоколлимационное изображение би-штриха было видимым параллельно штрихам измерительной сетки? Можно ли осуществить этот поворот непосредственно рукой или требуется регулировочное устройство?
- 86. Найти необходимое минимальное перемещение отсчетного микроскопа при сборке углоизмерительной головки (рис. 2.27) для осуществления его фокусировки на шкалу лимба (объектив микроскопа 40×0.65, окуляр имеет увеличение 10 крат).
- 87. Определите пороговую чувствительность поворота маховичка винтового окулярного микрометра (рис. 2.28) при условии, что шаг винта 1 мм, число заходов резьбы 1, увеличение окуляра 15 крат.
- 88. Влияют ли на точность работы спирального окулярного микрометра (рис. 2.23) погрешности конических зубчатых колес? Какие требования предъявляются к приводу поворота сетки? Выведите формулу для определения порога чувствительности поворота маховичка.
- 89. Какие требования предъявляются к механизму тонкой фокусировки микроскопа и какие параметры оптической систем ы микроскопа влияют на эти требования? Выведите зависимость, связывающую соответствующие параметры оптической системы микроскопа с пороговой чувствительностью движения органа управления механизма тонкой наводки:
 - а) системы Мейера (рис. 2.16);
 - б) системы Бауш и Ломб (рис. 2.19).

2. ИЛЛЮСТРАЦИИ К ЗАДАЧАМ









Рис. 2.1 Варианты крепления линзы в оправу: резьбовым кольцом (а и б); завальцовкой; с промежуточным пружинным кольцом





Рис. 2.3 Узел крепления микрообъектива к тубусу микроскопа







Рис. 2.4 Конструкции объектива: насыпной конструкции (а); насыпной в оправах конструкции (б); резьбовой конструкции (в)



Рис. 2.5 Линейный транслятор, перемещающийся в направляющих типа «ласточкин хвост»



Рис. 2.6 Маховик со шкалой



Рис. 2.7 Параллелограмный механизм



Рис. 2.8 Привод стереотрубы: с червячным механизмом (a); с косозубым зубчатым колесом





Рис. 2.9 Узел крепления лимба в подшипниках





Рис. 2.10 Схема измерительной каретки с цилиндрическими направляющими (а) и квадратными направляющими (б)



Рис. 2.11 Устройство юстировки плоского зеркала



Рис. 2.12 Функциональная схема визуального автоколлиматора



Рис. 2. 13 Функциональная схема визуального автоколлиматора с двойным зеркальным отражателем



Рис. 2.14 Двухплечий рычажный механизм



Рис. 2.15 Двухплечие рычажные механизмы, содержащие теоретические погрешности



Рис. 2.16 Функциональная схема механизма точной фокусировки микроскопа



Рис. 2.17 Механизм отклонения лучей с кулачковым приводом



Рис. 2.18 Микрометр с плоскопараллельной стеклянной пластиной



Рис. 2.19 Механизм точной фокусировки микроскопа



Рис. 2.20 Устройство контроля угла поворота зубчатого колеса червячного механизма: 1 - зубчатая рейка; 2 - зубчатое колесо; 3 - растр



Рис. 2.21 Склейка линз со следующими конструктивными параметрами

R1 = 53.21	d1 = 9.17	n1 = 1.5183	v1 = 64.1	$\alpha 1 = 68 \times 10^{-7}$	$\beta 1 = 24 \times 10^{-7}$
R2 = -39.45	d2 = 2.18	n2 = 1.6522	v2 = 33.9	$\alpha 2 = 82 \times 10^{-7}$	$\beta 2 = 34 \times 10^{-7}$
R3 = -126.47					

f 1 = 45.41 мм; f 2 = -89.43 мм; f скл = 88.13 мм



Рис. 2.22 Линзовое устройство отклонения лучей



Рис. 2.23 Микроскоп с окулярным микрометром, имеющим спиральную шкалу



Рис. 2.24 Регулируемая по высоте опора теодолита



Рис. 2.25 Варианты реализации привода отражательной дифракционной решётки



Рис. 2.26 Функциональная схема бинокля с оборачивающей призменной системой



Рис. 2.27 Функциональная схема установки контроля угла поворота лимба



Рис. 2.28 Функциональная схема окулярного винтового микрометра



Рис. 2.29 Узел крепления лимба и моменты сил, приводящие к его «упругому» мертвому ходу



Рис. 2.30 Функциональная схема зеркального объектива



Рис. 2.30 Линза, закрепленная в оправе с помощью резьбового кольца



Рис. 2.31 Отсчетная проекционная система



Рис. 2.33 График погрешности функционирования двухплечего тангенсного рычажного механизма (а) и его функциональная схема (б). Конструктивные параметры механизма d₁ = 75 мм и d₂ = 15 мм.



Рис. 2.34 График погрешности функционирования двухплечего синусного рычажного механизма (а) и его функциональная схема (б). Конструктивные параметры механизма R₁ = 100 мм и R₂ = 25 мм.



Рис. 2.35 Узел соединения корпуса оправы с объективом с помощью вкладышей, компенсирующих термодеформации



Рис. 2.36 Узел крепления зеркального объектива телескопа с термокомпенсатором: 1 - зеркальный объектив; 2 - фотоприемник; 3 стальное кольцо; 4 - инваровое кольцо



Рис. 2.37 Функциональная схема коррекционного устройства червячной передачи: 1 - червяк; 2 - зубчатое колесо; 3 - кулачок



Рис. 2.38 Схема компенсации погрешности шага винта с помощью коррекционной линейки



Рис. 2.39 Функциональная схема телеобъектива с фокусным расстоянием $f_{\text{сум}} = 500$ мм и фокусными расстояниями компонентов $f_1 = 88.13$ мм и $f_2 = -11.37$ мм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Высокоточные угловые измерения. Под редакцией проф. Якушенкова Ю.Г. М.: Машиностроение, 1987. 480 с.;
- 2. Иванцов А.И. Основы теории точности измерительных устройств. М.: Издательство стандартов, 1972. 2012 с.;
- 3. Ключникова Л.В., Ключников В.В. Проектирование оптико-механических приборов. СПб.: Политехника, 1995. 206 с.;
- Крынин Л.И. Основы проектирования конструкций объективов. СПб.: СПбГУИТМО, 2006. - 254 с.;
- 5. Латыев С.М., Егоров Г.В., Зверева Т.Л. Сборник задач по курсу «Конструирование оптических приборов». Л.:ЛИТМО, 1985. 38 с.;
- 6. Латыев С.М. Конструирование точных оптических приборов. СПб.:Издательство «Лань», 2015. 560 с.;
- 7. Латыев С.М. Компенсация погрешностей в оптических приборах. Л.: Машиностроение, 1985. 248 с.;
- 8. Маламед Е.Р. Конструирование оптических приборов космического базирования. СПб.: СПбГИТМО, 2002. 291 с.;
- 9. Натаровский С.Н. Методы проектирования современных оптических приборов. СПб.: СПбГУИТМО, 2009. 176 с.;
- 10. Плотников В.С., Варфоломеев Д.И., Пустовалов В.Е. Расчет и конструирование оптико-механических приборов. М.: Машиностроение, 1983. 256 с.;
- 11. Серебреницкий П.П. Общетехнический справочник. СПб.: Политехника. 2004. 445 с.;
- 12. Шарловский Ю.В.Регулировочные устройства приборов и их элементы. - М.: Машиностроение, 1976. - 311 с.;
- Гришанов А.В., Гришанов В.Н., Изжеуров Е.А., Моисеев С.Ю. Измерение пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения с применением матричных фотоприемников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2002. Т.4. №1. С. 73-80;
- 14. Солдатов В.П. Определение зависимости погрешности измерения перемещений оптико-электронными приборами с многоэлементными приемниками излучения от соотношения сигнал-шум // Измерительная техника. 2012. №5. С. 52-54.

университет итмо

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА КОМПЬЮТЕРНОЙ ФОТОНИКИ И ВИДЕОИНФОРМАТИКИ

Достижения в оптической науке, технике и технологиях за последние годы способствовали появлению нового направления – фотоники. Этот термин охватывает область науки и техники, связанную с использованием светового излучения (или потока фотонов) в оптических элементах, устройствах и системах.

На рубеже XX – XXI веков электронные информационные технологии достигли фундаментальных и технических пределов производительности при продолжающемся росте потребительского спроса на скорость и объем обрабатываемой и передаваемой информации. Решение данной проблемы потребовало разработки нового поколения информационно-телекоммуникационных систем. основанных на фотоники. В технологиях фотонике появилось новое динамично развивающееся направление, определяющее прогресс мировой науки и техники – оптоинформатика. Под оптоинформатикой понимают область науки и техники, связанную с исследованием, разработкой, созданием и эксплуатацией новых материалов, технологий, приборов и устройств, направленных на передачу, прием, обработку, хранение и отображение информации.

Изучение фотоники основывается на знании принципов формирования, преобразования, изображений, теории построения анализа информационных Интеграция фотоники компьютерных систем. И технологий позволяет создавать методы, которые возможно реализовать фотоники, обеспечивая исключительно средствами компьютерной развитие технологий качественно нового уровня.

По многим направлениям фотоники и оптоинформатики Россия находится на уровне промышленно-развитых стран. Приоритетными направлениями являются: волоконная оптика (работы академика Дианова Е.М.), голография (академик Денисюк Ю.Н.), полупроводниковые лазеры (академик Алферов Ж.И), полифункциональные оптические материалы (академик Петровский Г.Т.) и др.

Ввиду большого научного и практического значения направления «Фотоника И оптоинформатика», a также спроса на него на потребительском рынке, в 2002 г. в СПбГУ ИТМО был организован фотоники и оптоинформатики под руководством доктора факультет профессора физ.-мат. C.A. Козлова. По наук, инициативе профессорско-преподавательского состава, начиная c 2005 года. на факультете стала работать выпускающая кафедра компьютерной фотоники, которую возглавил доктор технических наук, профессор И.П. Гуров.

История кафедры началась в 1946 году. На всех этапах развития результаты научных исследований, проводимых сотрудниками кафедры, неизменно использовались в учебном процессе. Совершенствовались направления подготовки студентов, изменялось название кафедры, но всегда кафедра гордилась своими выпускниками.

Выпускники кафедры занимают видное место в оптической науке: академик РАН Ю.Н. Денисюк, изобретатель трехмерной голографии; член-корр. РАЕН, профессор Н.Г. Бахшиев, известный специалист в области спектроскопии межмолекулярных взаимодействий; Заслуженный деятель науки РФ, профессор Г.Н. Дульнев, крупный ученый в области теплофизики, долгие годы бывший ректором ЛИТМО; профессор И.М. Нагибина, исследования которой в области физической оптики получили широкое признание.

Одной из важнейших задач кафедры является организация учебного процесса и подготовка профессионалов в области компьютерной фотоники. Направление работы кафедры определяется развитием информационных технологий и компьютерных систем в области формирования, синтеза, обработки и анализа изображений на основе интеграции эффективных компьютерных систем с системами фотоники. Проводимые исследования в обработки области компьютерной когерентных И некогерентных обеспечивают изображений решение научно-технических задач оптической томографии, цифровой голографии, синтеза. анализа. распознавания и классификации изображений.

Научным консультантом работ кафедры в области компьютерной обработки изображений – иконики – является член-корреспондент РАН М.М. Мирошников.

Кафедра проводит работы в рамках международных научных проектов в сотрудничестве с ведущими зарубежными университетами, институтами и исследовательскими лабораториями Италии, Финляндии, Франции, Германии, Великобритании, Японии, США и других стран в области оптической когерентной томографии для биомедицинских исследований, цифровой голографии для исследования микро- и наноструктур, трехмерной фотографии микро- и макроскопических объектов, гиперспектральной обработки изображений.

В последнее время на кафедре активно развивается новое направление – видеоинформатика. Ввиду этого в 2010 году кафедра была переименована в кафедру компьютерной фотоники и видеоинформатики.

В 2011 году Университет получил статус Национального университета, исследовательского заслуга в ЭТОМ есть И преподавательского коллектива кафедры компьютерной фотоники и видеоинформатики. Эти обстоятельства позволяют обеспечивать и в дальнейшем подготовку высококлассных востребованных на рынке специалистов в области компьютерной фотоники и видеоинформатики.

Латыев Святослав Михайлович

Иванов Александр Николаевич

Основы конструирования оптико-электронных приборов и систем Сборник задач

Учебное пособие для самостоятельной работы по курсу «Основы конструирования оптико-электронных приборов и систем»

В авторской редакции Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО Зав. РИО Н.Ф. Гусарова Подписано к печати Заказ № Тираж 50 экз. Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49