

Министерство образования и науки  
Российской Федерации

---

ПСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

---

Ершова И.Г.  
Дмитриев С.И.

**РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ**

Методические указания по выполнению курсовой работы  
по дисциплине  
«Метрологическое обеспечение производства»

Псков  
2005

Рекомендовано к изданию Научно-методическим советом  
Псковского государственного политехнического института

Рецензенты:

- В.В. Шкуркин – профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты»
- В.Е. Иванов – главный инженер ПЭМ

**Расчет и конструирование измерительных приспособлений.** Методические указания по выполнению курсовой работы. 2-е изд. / И.Г. Ершова, С.И. Дмитриев – Псков, 2005. – 43с.

Методические указания содержат сведения необходимые для проектирования и расчета измерительного приспособления.

Методические указания предназначены для студентов механико-машиностроительного факультета всех форм обучения специальности 151001 – “Технология машиностроения” при изучении дисциплины “Метрологическое обеспечение производства”.

- © Псковский государственный политехнический институт, 2005
- © И.Г. Ершова, С.И. Дмитриев, 2005

## ВВЕДЕНИЕ

Метрологическое обеспечение является одним из важнейших этапов технологической подготовки производства, во многом определяет точность технологических операций.

При изучении курса «Метрологическое обеспечение производства» нужны знания и умения, приобретенные в процессе освоения общетехнических дисциплин: сопротивление материалов, теоретическая механика, металловедение, теория механизмов и машин, детали машин. Курс тесно связан также с другими дисциплинами, составляющими основу непрерывной технологической подготовки студентов: взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения, технология машиностроения, металлорежущие станки и др.

Знание материала курса необходимо для выполнения дипломного проекта.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ «Метрологическое обеспечение производства»

### 1. Цели изучения дисциплины

Неотъемлемой частью каждого технологического процесса является измерение. Измерение и контроль геометрических величин (длин, углов, формы и расположения поверхностей) наиболее массовые и специфические измерения в машиностроении, где на их основе контролируется качество продукции.

Для обеспечения измерений любых величин требуется проведение большого комплекса работ, связанных не только с разработкой и изготовлением средств измерений, но и с оценкой возможных погрешностей измерений. В отличие от измерений других величин измерение геометрических величин имеет ту специфику, что погрешность этих измерений зависит от большого количества влияющих факторов, связанных не только и не столько с погрешностью непосредственно средств измерения, сколько с условиями измерений, применяемых методик измерений и особенностями параметров самих измеряемых объектов.

Инженеры механики, подготовленные по специальности 151001 должны знать основные принципы метрологического обеспечения в машиностроении, владеть метрологической терминологией, уметь выбрать измерительные средства, имеющие в определенных условиях погрешность измерений, значением которой можно пренебречь, иметь навыки в правильной разработке схемы измерения геометрических

параметров деталей и при необходимости сконструировать измерительное приспособление.

## **2. Содержание разделов дисциплины**

### **Введение**

Назначение и содержание курса. Связь курса со смежными дисциплинами. Основные тенденции развития метрологии.

### **Раздел 1. Основополагающие понятия метрологического обеспечения производства**

Понятие «Метрологическое обеспечение» и его содержание. Научная основа метрологического обеспечения. Организационные, нормативные и технические основы метрологического обеспечения. Метрологическое обеспечение подготовки производства и процесса производства.

### **Раздел 2. Основы технических измерений**

Основные метрологические понятия и определения. Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 29-99. Физические величины и их измерение. Международная система единиц. Воспроизведение единиц физических величин и передача их размеров.

Виды и методы измерений. Прямые и косвенные измерения. Метод непосредственной оценки размеров и метод сравнения с мерой. Преимущества и недостатки различных методов. Контроль, различие функций измерения и контроля. Виды контроля.

Классификация средств измерений. Основные метрологические характеристики средств измерений. Погрешности средств измерений. ГОСТ 8.009-84 ГСИ.

### **Раздел 3. Погрешности измерений и их оценка**

Понятие о точности измерений. Погрешность измерений, основные составляющие погрешности измерения (абсолютные, относительные, статические и динамические погрешности). Систематические и случайные погрешности. Оценка погрешностей измерений.

Причины возникновения погрешностей измерения. Погрешность метода измерения, инструментальные и субъективные погрешности. Теоретические погрешности (погрешности схемы), технологические и эксплуатационные погрешности. Суммирование погрешностей измерения.

Нормальные условия выполнения измерений. ГОСТ 8.050-73 ГСИ. Допускаемые погрешности измерений линейных размеров в машиностроении. ГОСТ 8.051-81 ГСИ.

### **Раздел 4. Выбор методов и средств измерений**

Выбор метода измерений. Основные положения и порядок выбора средств измерений. Классификация средств измерений (по методу измерения, точности, целевому назначению): меры, калибры, универсальные средства измерений (механические измерительные приборы и инструменты, оптические, пневматические и электрические приборы). Выбор универсальных средств измерений. РД 50-98-86.

Выбор методов и средств измерения отклонений формы поверхностей. Особенности измерения отклонений формы. Методики и схемы измерения отклонений формы.

Выбор методов и средств измерения отклонений расположения поверхностей. Особенности измерения отклонений расположения поверхностей. Методики и схемы измерения отклонений расположения поверхностей.

Выбор средств измерения суммарных отклонений формы и расположения поверхностей. Особенности нормирования суммарных отклонений формы и расположения поверхностей. Погрешности измерений отклонений формы и расположения поверхностей.

### **Раздел 5. Структура измерительных приборов и основы конструирования**

Структурная схема измерительных приборов. Базирующий и чувствительный элементы, измерительные преобразователи (передаточные механизмы), установочные элементы, отсчетные, задающие и исполнительные устройства (устройства, создающие измерительные усилия, арретеры и другие вспомогательные элементы приборов). Требования, предъявляемые к основным элементам средств измерения.

Конструирование измерительных приборов как процесс материализации схемы. Принципы конструирования: принцип ограничения смещений и поворотов, принцип Аббе, принцип Тейлора, принцип инверсии.

Направляющие для поступательного и вращательного перемещений. Направляющие с трением скольжения, с трением качения и упругие. Стопорные устройства.

### **Раздел 6. Метрологическое обеспечение технологической подготовки производства**

Метрологическая экспертиза и метрологическая проработка технической документации. Цели и содержание метрологической проработки (метрологической экспертизы) конструкторской документации

при разработке средств измерений. Утверждение типа средств измерений. Разработка методик проведения измерений. Содержание методики проведения измерений. Методические основы разработки системы измерений: место проведения измерений, выбор измеряемых параметров, автоматизация процессов измерений. Метрологическое обеспечение при сертификации и разработке систем качества.

### **Раздел 7. Метрологическое обеспечение действующего производства**

Поверка и калибровка средств измерений. Методика поверки (калибровки) средств измерений. Метрологический контроль и надзор. Государственный метрологический контроль и надзор. Метрологический контроль и надзор на предприятиях и в организациях (у юридических лиц).

### **3. Рекомендуемая литература для изучения дисциплины**

#### **3.1. Основная**

1. Метрологическое обеспечение технологических процессов изготовления изделий в машиностроении: Учебное пособие/ Н.П. Солнышкин, Л.В. Дашков, С.И. Дмитриев. Под общ. ред. Н.П. Солнышкина – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. – 198с.

2. Сергеев А.Г., Латышев М.В. Терегеря В.В. Метрология, стандартизация, сертификация: Учебное пособие. – М.: Логос, 2003. – 536с.

3. Радкевич Я.М. Метрология, стандартизация и сертификация: Учеб. для вузов – М.: Высш. шк., 2004. – 767 с.

4. Расчет и конструирование измерительных приспособлений. Методические указания по выполнению курсовой работы /С.И. Дмитриев, И.Г. Ершова; Под общ. ред. Н.П. Солнышкина – СПб.: Изд. СПбГПУ, 2005, – 44с.

5. Определение погрешностей измерительных приборов: Методические указания по выполнению лабораторной работы /Л.В. Дашков, И.Г. Ершова. СПб.: Изд. СПбГТУ, 2001, – 25с.

6. Определение погрешности показаний, обусловленных схемой измерительного устройства. Методические указания по выполнению лабораторной работы / И.Г. Ершова. СПб.: Изд. СПбГТУ, 2002, – 21с.

#### **3.2. Дополнительная**

7. Марков Н. Н. Метрологическое обеспечение в машиностроении. Учебник для высших учебных заведений - М.: Изд-во «СТАНКИН», 1995, – 468 с.

8. Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология: Учебное пособие для вузов. – М.: Логос, 2000. – 510 с.

9. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х томах. Т.2. Под ред. Дальского А.М., Косиловой А. Г. 5-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2001г. – 496 с.

10. Схиртладзе А. Г. Технологическая оснастка машиностроительных производств. Альбом. Уч.пособие в 2-х частях. М.: Изд-во МГТУ, «Станки», 1999.

## **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ**

### **Раздел 1**

1. Что понимается под метрологическим обеспечением?
2. В чем состоят нормативно-правовые аспекты метрологии?
3. Научные, организационные и технические основы метрологического обеспечения.
4. Общий комплекс работ по метрологическому обеспечению подготовки производства и действующего производства.

ЛИТЕРАТУРА: [1] с.4-10,  
[2] с.218-238.

### **Раздел 2**

5. Основные метрологические понятия: измерение, контроль, испытание, единство измерений, точность и погрешность измерений, средства измерений.
6. Дайте определение: физическая величина, шкала физической величины, размерность физической величины, эталон единицы физической величины.
7. Назовите основные виды и основные методы измерений.
8. Что такое контроль и чем он отличается от измерения. Какие виды контроля существуют?
9. Назовите виды средств измерений.
10. Назовите основные метрологические характеристики средств измерений.
11. Что такое класс точности средства измерений?
12. Назовите виды погрешностей средств измерений.

ЛИТЕРАТУРА: [1] с.10-33,  
[2] с.1-42, с.110-164,  
[3] с.9-29, с/106-117.

### Раздел 3

13. Погрешность измерений. Основные составляющие погрешности измерения.
14. Статические и динамические погрешности измерений.
15. Случайные и систематические погрешности измерений. Суммирование случайных и систематических погрешностей.
16. Назовите причины возникновения основных погрешностей измерения.
17. В чем заключается погрешность метода при измерении?
18. Назовите составляющие погрешности измерительного прибора.
19. Теоретическая погрешность измерительного прибора (погрешность схемы). Понятие синусного и тангенсного рычагов.
20. Назовите источники технологической погрешности измерительного прибора.
21. Назовите источники и основные составляющие эксплуатационной погрешности при измерениях (погрешность от температурных деформаций, погрешность от силовых деформаций, погрешность отсчета).
22. Назовите основные составляющие субъективных погрешностей.
23. Суммарная погрешность измерения. На чем основана теория расчета суммирования погрешностей измерения?
24. В чем заключаются нормальные условия проведения измерений?
25. Допускаемые погрешности измерений линейных размеров в машиностроении.

ЛИТЕРАТУРА: [1] с.34-59,  
[2] с.46-110,  
[3] с.29-106.

### Раздел 4

26. В чем состоят основные принципы выбора средств измерений?
27. В чем заключается выбор универсальных средств измерений линейных размеров (РД 50 – 98 – 86)?
28. Назовите особенности измерения отклонений формы поверхностей.
29. В чем заключается выбор методов и средств измерения отклонений формы поверхностей?
30. Приведите схемы измерения отклонений формы поверхностей.
31. В чем заключается выбор методов и средств измерений отклонений расположения поверхностей?
32. Приведите схемы измерения отклонений расположения поверхностей.

33. В чем заключается выбор средств измерений суммарных отклонений формы и расположения поверхностей?
34. Приведите схемы измерения радиального и торцового биения.  
ЛИТЕРАТУРА: [1] с.60-76,  
[2] с.179-217.

### Раздел 5

35. Составьте структурную схему измерительного прибора.
36. В чем заключается выбор базировочного и чувствительного элементов измерительного прибора?
37. Приведите примеры базировочного и чувствительного элементов измерительного прибора.
38. Передаточные механизмы. Приведите примеры передаточных устройств.
39. Назовите основные группы измерительных преобразователей (предельные, отсчетные, специальные). Дайте их краткую характеристику.
40. Вспомогательные устройства измерительных приборов: установочные элементы, отсчетные, задающие и исполнительные устройства.
41. Конструирование измерительных приборов как процесс материализации схемы.
42. Принципы конструирования соединений: принцип ограничения смещений и поворотов.
43. В чем заключается принцип Аббе, принцип Тейлора, принцип инверсии?
44. Направляющие для поступательного перемещения. Требования, виды, примеры использования.
45. Направляющие для вращательного перемещения. Требования, виды, примеры использования.
46. Направляющие средств измерений с трением скольжения. Требования, виды, примеры использования.
47. Направляющие средств измерений с трением качения. Требования, виды, примеры использования.
48. Упругие направляющие. Требования, виды, примеры использования.
49. Стопорные узлы средств измерений (требования, виды, принципы расчета).

ЛИТЕРАТУРА: [6, 9, 10].

## Раздел 6

50. В чем заключается метрологическое обеспечение технологической подготовки производства? Назовите общий комплекс работ по метрологическому обеспечению при подготовке производства
51. В чем заключается метрологическая проработка конструкторской и технологической документации?
52. В чем заключается метрологическая экспертиза конструкторской и технологической документации?
53. Как происходит утверждение типа средств измерений?
54. В чем заключается разработка методик проведения измерений?
55. Содержание основных разделов методик проведения измерений.
56. Назовите методические основы разработки системы измерений.
57. Сертификация и система качества. Основные положения.

ЛИТЕРАТУРА: [1] с.82-95,  
[2] с.165-179.

## Раздел 7

58. Метрологическое обеспечение действующего производства, основные цели.
59. Каковы основные функции Государственной метрологической службы?
60. В чем состоит государственный метрологический надзор и контроль?
61. Назовите основные принципы государственных испытаний.
62. Назовите основные виды проверок средств измерений.
63. В чем заключается калибровка средств измерений?
64. Разработка методик выполнения измерений (МВИ) и основные требования к методикам выполнения измерений.
65. В чем заключается метрологическая экспертиза нормативно-технической документации?

ЛИТЕРАТУРА: [1] с.95-100,  
[2] с.238-263,  
[3] с.117-170.

## ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа включает в себя проектирование и расчет измерительного приспособления – средства измерения предназначенного для получения значений размерно-геометрических параметров детали и имеющего устройство для преобразования измеряемой величины в сигнал измерительной информации и его индикации в форме, наиболее доступной для восприятия.

В качестве задания используется чертеж детали с указанием параметра (параметров), подлежащих измерению, их диапазона изменения и качества (степени) точности. Контролируемыми параметрами могут быть размеры (линейные, диаметральные или угловые), погрешности формы, погрешности расположения или суммарные погрешности формы и расположения поверхностей детали.

Курсовая работа состоит из расчетно-пояснительной записки объемом 15-20 страниц формата А4 и одного листа графического материала формата А1. Пояснительная записка должна быть оформлена в соответствии с положением «Правила оформления студенческих выпускных работ и отчетов» [10], графическая часть – в соответствии с требованиями ЕСКД. При проведении расчетов рекомендуется пользоваться учебным пособием [6, 11].

При выполнении задания необходимо:

- провести анализ поставленной измерительной задачи;
- определить перечень контролируемых параметров;
- оценить величину допустимой погрешности измерения;
- установить условия проведения измерений;
- выбрать и обосновать метод измерения;
- разработать схему измерения и схему измерительного приспособления;
- рассчитать ожидаемую погрешность результата измерения.

Пояснительная записка, кроме того, должна содержать необходимые конструкторские расчеты. Такими расчетами могут быть: проверка статической и геометрической определенности соединений элементов приборов; расчет сил и моментов в направляющих и проверка условия отсутствия заклинивания в направляющих; расчет ограничителей движения и стопорных устройств; расчет устройств, создающих постоянное измерительное усилие и т.п.

## СОДЕРЖАНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

Расчетно-пояснительная записка должна включать в себя следующие основные разделы:

Введение

1. Анализ поставленной измерительной задачи.
2. Установление условий проведения измерений.
3. Выбор и обоснование метода и схемы измерения.
4. Расчет погрешности измерения.
5. Конструкторские расчеты.
6. Графическая часть.

Список использованных источников.

**Рассмотрим содержание этих этапов на следующем примере.**

Расчитать и спроектировать измерительное приспособление для контроля симметричности паза вала (рис.1).

Материал детали:	сталь 20;
Допуск симметричности:	$T = 0,04 \text{ мм}$ (независимый);
Допуск круглости опорных шеек вала:	$T = 0,008 \text{ мм}$ ;
Допуск плоскостности поверхностей паза:	$T = 0,010 \text{ мм}$ ;
Производство:	серийное.

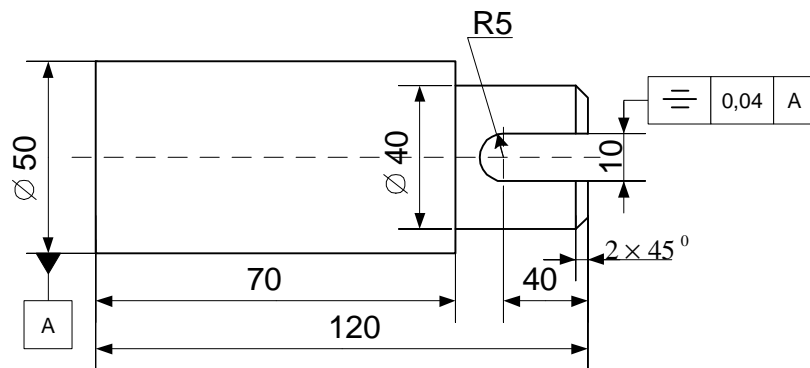


Рис.1. Эскиз измеряемой детали

## 1. Анализ поставленной измерительной задачи

Анализ поставленной измерительной задачи создает предпосылки для получения измерений высокого качества, так как позволяет исключить проведение некорректных измерительных операций. При таком анализе, прежде всего, необходимо ответить на два вопроса: какие параметры детали подлежат измерению и какой точности должен быть результат измерения.

### 1.1. Установление перечня измеряемых размерно-геометрических параметров детали.

Конструкция измерительного приспособления определяется рядом факторов. Из них на первое место следует поставить характеристики самих измеряемых величин. Так как в машиностроении сложились определенные правила задания размеров, точности формы и взаимного расположения поверхностей, а так же других параметров, то разработка схемы и конструкции измерительного приспособления должна быть основана, в первую очередь, на решении вопроса: что измеряется? Если при измерении размеров ответ на этот вопрос, как правило, не вызывает затруднений (измеряется расстояние между двумя точками), то при измерении отклонений формы и расположения поверхностей могут возникнуть определенные сложности, связанные со спецификой нормирования допусков формы и расположения поверхностей и необходимостью их взаимного учета или исключения. Поэтому при ответе на первый вопрос следует пользоваться ГОСТ 24642-81 (СТ СЭВ 301-76) и ГОСТ 2.308-79 (СТ СЭВ 368-76), в которых приведены основные понятия, термины, определения и обозначения по видам отклонений формы и расположения поверхностей их нормированию и принципам измерения. Рекомендуется также пользоваться классификатором видов размеров, отклонений формы и расположения поверхностей в машиностроении [3, 13], так как в основу классификатора были положены принципы общности схем и методов измерений, что дает предпосылку правильного выбора схемы и метода измерений.

• В соответствии с заданием примера (рис.1) необходимо измерить отклонение от симметричности паза вала относительно базового элемента – наибольшее расстояние  $\Delta$  между плоскостью симметрии (осью) рассматриваемого элемента и плоскостью симметрии базового элемента в пределах нормируемого участка (рис.2).

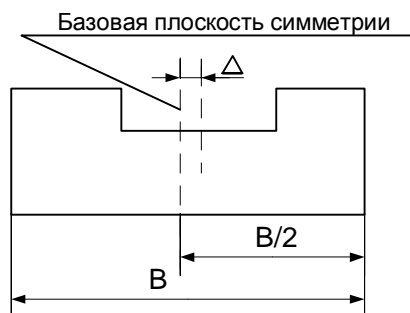


Рис. 2. Отклонение от симметричности относительно базового элемента

Нормирование погрешности расположения поверхности и формы поверхности осуществляются относительно прилегающих поверхностей, следовательно, измерять их нужно от прилегающих поверхностей. Прилегающая поверхность – поверхность, имеющая форму номинальной поверхности, соприкасающейся с реальной поверхностью и расположенная вне материала детали так, чтобы отклонение от нее наиболее удаленной точки реальной поверхности в пределах нормируемого участка имело минимальное значение.

Прилегающую поверхность необходимо материализовать. Способы материализации:

1. За счет поверхностей жестких оправок, лекальных линеек, поверочных линеек, контрольных плит и т.д.
2. За счет реальных поверхностей.

### 1.2. Расчет допускаемой погрешности измерения.

При оценке допускаемой погрешности измерений (ответе на второй вопрос) следует пользоваться ГОСТ 8.051-81. В этом стандарте показана связь между относительной погрешностью измерения

$A_{MET(\sigma)} = \frac{\sigma}{T} 100\%$  (где  $\sigma$  - среднее квадратическое отклонение погрешности измерения;  $T$  - допуск на контролируемый размер), вероятностью  $m$  принятия бракованных деталей как годных (брак 2-го рода), вероятностью  $n$  неправильно забракованных деталей (брак 1-го рода) и вероятностью  $c$  выхода размера за каждую границу поля допуска у

неправильно принятых бракованных деталей. Используя эту связь и руководствуясь масштабами производства контролируемых изделий, требованиями к их качеству, количеством контролируемых параметров, следует оценить допустимые значения брака контроля 1-го ( $n$ ) и 2-го ( $m$ ) рода. Воспользовавшись таблицами ГОСТ 8.051-81, по допустимым значениям вероятности брака контроля необходимо найти отношение среднего квадратического отклонения погрешности измерений к допуску на контролируемый параметр. Зная допуск, можно оценить среднее квадратическое отклонение погрешности измерения  $\sigma$ .

В соответствии с ГОСТ 8.051-81 допускаемая погрешность измерения включает случайные и неучтенные систематические погрешности измерения. Случайная погрешность измерения не должна превышать 0,6 допускаемой погрешности измерения и принимается равной  $2\sigma$ .

Исходя из этого, предельную допускаемую погрешность измерения  $\delta_{изм}$  следует принять равной:  $\delta_{изм} = \frac{2\sigma}{0,6}$ .

При определении параметров  $m$  и  $n$  рекомендуется принимать (ГОСТ 8.051-81) следующие значения  $A_{MET(\sigma)}$ :

- 16% для квалитетов 2 - 7;
- 12% для квалитетов 8 и 9;
- 10% - для квалитетов 10 и грубее.

Для ориентировочного определения допустимой погрешности измерения можно воспользоваться таблицами ГОСТ 8.051-81, в которых  $\delta_{изм}$  приведена в зависимости от квалитета (допуска) контролируемого параметра и величины номинального размера.

• Для рассматриваемого примера (рис.1) за допускаемую погрешность измерения принимаем величину

$$\delta_{изм} = \frac{2\sigma}{0,6} = \frac{2 \cdot 4,8}{0,6} = 16 \text{ мкм},$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение погрешности измерения, которое определяется в зависимости от погрешности изготовления детали, закона распределения измеряемой величины и закона распределения погрешности измерения.

Предполагаем, что погрешность изготовления детали укладывается в поле допуска. Закон распределения измеряемой величины – закон Релея. Закон распределения погрешности измерения – нормальный.

В соответствии с ГОСТ 8.051-81 относительная погрешность измерения:

$$A_{мет} = \frac{\sigma}{T} 100\% \Rightarrow \sigma = \frac{A_{мет} \cdot T}{100\%}; \Rightarrow \sigma = \frac{12 \cdot 40}{100} = 4,8 \text{ мкм} .$$

Принято: при измерении размера с точностью 8...9 квалитет величина  $A_{мет} = 12\%$ , а так как допуск на размер равен 0,04 мм, то можно предположить, что данный размер выполнен по 8 квалитету [ГОСТ 24642-81].

## 2. Установление условий проведения измерения

### 2.1. Нормальные условия проведения измерений.

Каждое измерение выполняется в определенных условиях, которое характеризуется одной или несколькими внешними влияющими величинами. Эти величины часто оказывают заметное влияние на измеряемую величину и используемое средство измерений.

С целью обеспечения единства измерений к условиям их проведения предъявляются жесткие требования. Для конкретных областей измерений устанавливают единые условия, называемые нормальными. Значение влияющей величины, соответствующее нормальным условиям называют номинальным значением влияющей величины. Номинальные значения влияющих величин при выполнении линейных и угловых измерений регламентирует ГОСТ 8.050-73.

Согласно ГОСТ 8.050-73 ГСИ. Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений:

- температура окружающей среды 20°C;
- атмосферное давление 101324,72 Па (760 мм рт. ст.);
- относительная влажность окружающего воздуха 58 % (нормальное парциальное давление водяных паров 1333,22 Па);
- ускорение свободного падения (ускорение силы тяжести) 9,8 м/с<sup>2</sup>;
- направление линии измерения линейных размеров до 160 мм у наружных поверхностей – вертикальное, в остальных случаях – горизонтальное;
- относительная скорость движения внешней среды равна нулю;
- значения внешних сил равны нулю.

### 2.2. Установление области допустимых отклонений основных влияющих величин.

В реальных условиях при выполнении измерительных операций трудно обеспечить определенные номинальные значения влияющих величин. Поэтому задача сводится к установлению пределов возможных изменений влияющих величин.

Наиболее простыми и доступными с точки зрения пользования являются рекомендации по условиям измерения, выдаваемые в виде таблиц и номограмм. Такие рекомендации, как правило, содержат ряды допускаемых отклонений или отклонений и колебаний влияющих величин, данные в зависимости от размеров или массы контролируемых изделий и точности контролируемого параметра. Таблицы, построенные по этим принципам, включены в ГОСТ 8.050-73.

Ряд указанных условий и представленных ниже допускаемых отклонений относится к рабочему пространству, окружающего средство измерений и объект контроля, влиянием величин вне которого на результат измерения можно пренебречь.

Стандарт определяет нормальную область значений влияющих величин при линейных и угловых измерениях, при обеспечении которой погрешность средства измерений может превышать допускаемую основную погрешность средства измерения примерно на 0,1 допуска на изготовление. Эта область определяется следующими пределами значений влияющих величин.

1. Пределы допустимых отклонений от нормального направления линии измерения и нормированных параметров ориентации средств и объектов измерений при линейных измерениях составляют:  $\pm 1^\circ$  при контроле деталей с нормированной точностью по квалитетам 2 – 4;  $\pm 2^\circ$  – по квалитетам 5 – 9;  $\pm 5^\circ$  – по квалитетам 10 – 17, а при измерениях углов:  $\pm 0,5^\circ$  – по 1,2-й степеням точности;  $\pm 1,5^\circ$  по 3 – 5-й степеням точности.

2. Отклонение температуры объекта измерения и рабочего пространства от нормального значения в процессе измерения должны соответствовать указанным в табл. 1. При измерениях углов пределы допускаемого отклонения температуры от нормального значения составляют  $\pm 3,5^\circ\text{C}$ .

Таблица 1

**Пределы допускаемого отклонения температуры объекта измерения и рабочего пространства от нормальной, °С**

Размеры, мм	Квалитеты				
	3	4	5 - 9	10 - 11	12 - 17
Св. 1 до 18	± 0,8	± 1,0	± 1,5	± 3	± 4
» 18 » 50	± 0,3	± 0,5	± 1,0	± 2	± 3
» 50 » 500	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 1	± 2

Если в рабочее пространство помещается деталь с отклонением от нормальной температуры большим, чем указано в табл. 1, то деталь должна выдерживаться в рабочем пространстве (табл. 2). Средства измерений должны находиться в условиях, указанных в табл. 2, не менее 24 ч до начала измерений.

Таблица 2

**Время выдержки объектов контроля до начала измерений в рабочем пространстве, ч.**

Масса объекта контроля, кг	Квалитеты точности объекта контроля			
	2 - 4	5 - 9	10 - 11	12 - 17
	Начальное отклонение температуры, °С			
	1,5	2,5	3,5	5
До 10	6	4	3	2
Св. 10 до 50	14	8	6	4
» 50 » 200	24	14	10	7
» 200 » 500	36	20	16	12

Пределы допускаемой в процессе измерения нестационарной составляющей разности температур в любых двух точках и изменения температуры в любой точке рабочего пространства, а также находящихся в нем поверхностей измеряемого объекта и средств измерений должны соответствовать указанному в табл. 3.

Таблица 3

**Допускаемые изменения температуры в одной и двух точках рабочего пространства, поверхностей средства и объекта измерения при линейных измерениях**

Допускаемые отклонения температуры от нормальной, °С	Допустимые изменения температуры, °С		Допускаемая разность температур в двух точках
	в течение 0,5 ч.	в течение 12 ч.	
± 0,1	0,02	0,1	0,02
± 0,2	0,05	0,2	0,05
± 0,3	0,1	0,2	0,1
± 0,5	0,1	0,5	0,2
± 0,8	0,1	0,5	0,2
± 1,0	0,1	0,5	0,2
± 1,5	0,2	1,0	0,2
± 2,0	0,2	2,0	0,2
± 3,0	0,5	3,0	0,5
± 4,0	0,5	3,0	0,5

3. В рабочем пространстве допускаются только плавные изменения температуры со скоростью не более 0,1°С/мин.

4. Давление воздуха в рабочем пространстве не должно быть менее атмосферного. Допускается превышение атмосферного давления не более чем на 3 кПа.

5. Допускаемое отклонение влажности ±20%.

6. Уровень шума в рабочем пространстве не должен превышать 80 дБ при измерениях величин с нормированной точностью с 6-го по 10-й квалитет.

Однако такие рекомендации, ввиду того, что они даются безотносительно к размерам, конфигурации и материалу измеряемых деталей, а также к используемым средствам измерений, могут носить только сугубо ориентировочный характер. Поэтому при выполнении курсовой работы следует, где это возможно, определять допустимые области изменения влияющих величин расчетным путем. Наиболее просто такая задача решается для установления температурного режима измерений.

### 2.3. Расчет температурного режима измерений.

Температурный режим – это условная разность температур объекта измерения (детали) и измерительного средства (измерительного приспособления), при которой в определенных «идеальных» условиях возникает та же температурная погрешность, что и в реальных условиях. «Идеальные» условия предусматривают, что объект и средство измерения имеют постоянную по их объемам температуру и одинаковые коэффициенты линейного расширения, равные для стали  $11,6 \cdot 10^{-6}$  1/град [9]. Предельное значение температурного режима может быть определено по формуле:

$$\vartheta_t = \sqrt{\left[ \Delta t_1 \cdot \frac{(\alpha_{II} - \alpha_D)_{\max}}{11,6 \cdot 10^{-6}} \right]^2 + \left( \Delta t_2 \cdot \frac{\alpha_{\max}}{11,6 \cdot 10^{-6}} \right)^2},$$

где  $\Delta t_1$  – отклонение температуры воздуха от 20°C;  $\Delta t_2$  – кратковременные колебания температуры рабочего пространства за время измерения;  $\alpha_D$  – коэффициент линейного расширения материала детали, 1/град;  $\alpha_{II}$  – коэффициент линейного расширения материала приспособления, 1/град;  $(\alpha_{II} - \alpha_D)_{\max}$  – максимально возможная разность значений коэффициентов линейного расширения материала приспособления и детали;  $\alpha_{\max}$  – максимальное значение коэффициента линейного расширения материала приспособления или измеряемой детали.

Значения  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  оцениваются приближенно, исходя из вероятных предельных отклонений и колебаний температуры среды для цеховых условий, помещений ОТК. Коэффициенты линейного расширения материала детали и прибора (элементов приспособления) необходимо выбрать по справочнику, например [9].

• Определим предельное значение температурного режима для рассматриваемого примера (рис. 1).

$$\vartheta_t = \sqrt{\left[ 1 \cdot \frac{(15,0 \cdot 10^{-6} - 11,1 \cdot 10^{-6})}{11,6 \cdot 10^{-6}} \right]^2 + \left[ \frac{0,1 \cdot 15 \cdot 10^{-6}}{11,6 \cdot 10^{-6}} \right]^2} = 0,36 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где  $\Delta t_1 = 1^\circ\text{C}$  – отклонение температуры воздуха от 20°C (табл. 1 - для 8 качества);

$\Delta t_2 = 0,1^\circ\text{C}$  – кратковременные колебания температуры рабочего пространства за время измерения (в течение 0,5 часа – табл.3);

$\alpha_D = 11,1 \cdot 10^{-6}$  1/град – коэффициент линейного расширения материала детали;

$\alpha_{II} = (10 \dots 15) \cdot 10^{-6}$  1/град – коэффициент линейного расширения материала приспособления; т.к. материалы из которых будут сделаны детали приспособлений пока неизвестны, то мы вынуждены взять полный интервал коэффициентов линейного расширения сталей;

$(\alpha_{II} - \alpha_D)_{\max} = 3,9 \cdot 10^{-6}$  1/град – максимально возможная разность значений коэффициентов линейного расширения материала прибора и детали;

$\alpha_{\max} = 15 \cdot 10^{-6}$  1/град – максимальное значение коэффициента линейного расширения материала прибора или измеряемой детали.

## 3. Выбор и обоснование метода и схемы измерения

### 3.1. Выбор и обоснование метода измерения

Выбор того или иного метода измерений зависит от измерительной задачи, которую следует решить (точность результата измерений, быстрота его получения, и др.), а так же от особенностей измеряемых параметров и от видов используемых средств измерений. Метод измерения представляет собой способ решения измерительной задачи, характеризующийся его теоретическим обоснованием и разработкой основных приемов применения средства измерений.

В зависимости от приемов получения измерительной информации и характера оценки измеряемой величины различают прямой и косвенный метод измерения.

Для линейных измерений наибольшее распространение получили прямые методы измерений: метод непосредственной оценки (погрешность метода отсутствует) и метод сравнения с мерой (погрешность этого метода определяется погрешностью используемой меры, а погрешности, связанные с температурными и силовыми деформациями компенсируются настройкой измерительного приспособления).

Если рассмотренные методы не позволяют решить измерительную задачу, прибегают к косвенным методам, при которых искомое значение величины  $Y$  находят на основании известной зависимости между  $Y$  и величинами  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , подвергаемыми прямым измерениям  $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Погрешность косвенных измерений параметров  $x_i$

$$\Delta_M = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2},$$

где  $\Delta x_i$  - погрешность прямого измерения  $i$ -го параметра.

Выбор и обоснование метода измерения должен заканчиваться оценкой методической погрешности. Ее величина не должна превышать  $(0,25...0,5) \cdot \delta_{изм}$ .

### 3.2. Разработка схемы измерительного приспособления

Схема измерительного приспособления должна разрабатываться на основе принципиальных схем измерения размерно-геометрических параметров деталей: размеров, отклонений формы поверхностей, отклонений расположения поверхностей, суммарных отклонений формы и расположения поверхностей, шероховатости и др. Такие схемы разработаны на основе соответствующих стандартов и приведены в учебной и справочной литературе (см., например, [2, 3, 4, 5, 9, 13]).

При разработке схемы измерительного приспособления необходимо стремиться к тому, чтобы конструкция приспособления была по возможности проще, а погрешность показаний, обусловленная схемой, была бы как можно меньше. Этого можно достичь, если при разработке схемы приспособления руководствоваться следующими положениями:

1) линия действия измерительного приспособления должна располагаться вдоль контролируемого геометрического параметра (принцип Аббе);

2) число звеньев схемы приспособления, выполняющих передаточную функцию должно быть минимальным (принцип наикратчайшей размерной цепи);

3) протяженность отдельных звеньев схемы в направлении измерения должна быть наименьшей;

4) число передаточных механизмов, выполняющих масштабную функцию, должно быть минимальным, а их характеристики (передаточные функции) линейными;

5) измеряемая деталь относительно приспособления должна быть лишена 6-и степеней свободы. Исключение может составлять лишь свобода поворота детали вокруг оси, совпадающей с направлением измерения;

б) при использовании в схеме измерительного приспособления рычажных передач необходимо стремиться к тому, чтобы рычаги были одноименными (синусными или тангенсными). Центры сфер должны быть расположены на теоретическом рычаге в его начальном положении, а обе плоскости должны быть параллельны плечам теоретического рычага в этом положении, и составлять с ними одинаковый угол одного знака [14];

8) вместо опор качения и скольжения для поступательно и вращательно перемещающихся пар следует применять звенья, подвешенные на плоских пружинах;

9) контакт чувствительного элемента измерительного приспособления с поверхностью детали должен быть точечным.

Разработанную схему измерительного приспособления необходимо проверить на соблюдение принципа инверсии [14, с.140]:

– условия измерения должны соответствовать условиям эксплуатации и формообразования детали;

– траектория движения при контроле (измерении) соответствует траектории движения при эксплуатации и формообразовании;

– линия измерения совпадает с направлением рабочего усилия при эксплуатации;

– измерительные, конструкторские и технологические базы совпадают;

– форма измерительного наконечника, силовая нагрузка на деталь и другие параметры соответствуют параметрам сопрягаемой с ней контрдетали;

– физические (в частности геометрические) свойства образцовой детали, используемой при настройке измерительного приспособления, подобны свойствам контролируемой детали.

● Проанализировав типовые примеры схем измерения по различным источникам [2, 3, 4, 5, 9, 13], выбираем типовую схему измерения для нашего примера (рис.3):

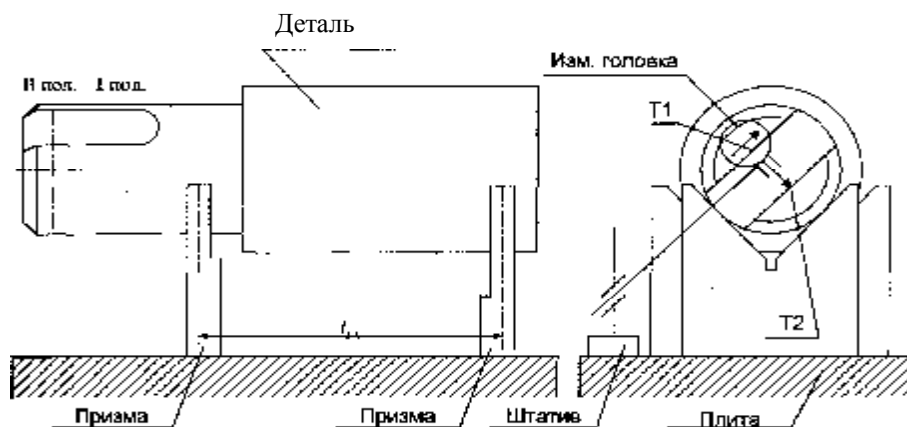


Рис.3. Типовая схема измерения

### 3.3. Разработка измерительного приспособления

Деталь с пазом устанавливаем на две ножевидные призмы соответствующей высоты таким образом, чтобы плоскости проверяемого паза располагались параллельно опорным поверхностям призм. Измерительную головку, укрепленную на штативе, располагаем так, чтобы ось ее лежала в плоскости, нормальной к опорной поверхности призм.

Покачивая деталь вокруг своей оси, и добиваясь минимального показания измерительной головки последовательно в точках (Т2) I-го и II-го положений, снимаем отсчеты. Затем деталь поворачиваем вокруг своей оси на 180°, и снимаем последовательно отсчеты в точках (Т1) I-го и II-го положений. Наибольшая разность отсчетов в точках Т1 и Т2 (в I и II положениях) определит удвоенную несимметричность оси паза относительно общей оси проверяемого вала.

На основании выбранной схемы измерения разрабатываем сборочный чертеж измерительного приспособления [12].

### 3.4. Выбор стандартной измерительной головки

Выбор стандартной измерительной головки проводится в соответствии с РДМУ 98-77. Исходными данными для выбора измерительной головки являются номинальный размер измеряемого параметра, длина нормируемого участка, допуск измеряемого параметра, допускаемая погрешность измерения.

• Для рассматриваемого примера по данным таблиц РДМУ 98-77 выбираем многооборотную измерительную головку 2МИГ.

#### Метрологические характеристики измерительной головки 2МИГ:

Цена деления – 2 мкм;

Пределы измерения – 0...2 мм;

Допускаемая погрешность показаний:

- в пределах 1 оборота – 3 мкм;
- в пределах 1 мм – 4 мкм;
- в пределах 2 мм – 6 мкм;

Измерительное усилие – 2 Н;

Колебания измерительного усилия – 0,7 Н;

Посадочное место – 8h9.

## 4. Расчет погрешности измерения

Составляющими погрешности измерения являются:

$$\Delta_{изм} \supset \Delta_M + \Delta_{III} + \Delta_U + \Delta_C,$$

где  $\Delta_M$  - погрешность метода,  $\Delta_{III}$  - погрешность измерительного приспособления,  $\Delta_U$  - погрешность условий измерения (погрешность из-за отличия условий измерения от нормальных, связанных с понятием влияющих физических величин, которые обусловлены температурными – см. п.2.1. и учитываются при расчете погрешность измерительного приспособления) и субъективная погрешность  $\Delta_C$ , зависящая от оператора.

### 4.1. Погрешность метода измерения

Основной отличительной особенностью методических погрешностей является то обстоятельство, что они не могут быть указаны в паспорте измерительного приспособления, а должны оцениваться при организации выбранной методики измерений. Такая оценка достаточно сложна. Она требует обстоятельного экспериментального метрологического исследования принятого метода измерений. При использовании наиболее распространенных методов измерения (прямых, косвенных, абсолютных, относительных) линейных и угловых величин оценку погрешности метода можно осуществить по правилам, приведенным в п. 3.1.

• В соответствии с РДМУ 98-77 методическая погрешность для выбранной схемы измерения (рис.3) будет определяться по формуле:

$$\Delta_M = \sqrt{2\Delta_1^2 + \left[ \delta_{некрk} \frac{L}{l_{i-k}} - \delta_{некрi} \left( \frac{L}{l_{i-k}} - 1 \right) \right]^2} + 0,3\delta_3^2 .$$

После подстановки данных, получим:

$$\Delta_M = \sqrt{2 \cdot 0,003^2 + \left[ 0,008 \frac{30}{70} - 0,008 \cdot \left( \frac{30}{70} - 1 \right) \right]^2} + 0,3 \cdot 0,010 = 0,0092 \text{ мм} =$$

$= 9,2 \text{ мкм}$ ,

где  $\Delta_1 = 0,003 \text{ мм}$  – погрешность измерительной головки;

$\delta_{некрk,i} = 0,008 \text{ мм}$  – допуск на некрутость наружных цилиндрических поверхностей проверяемой детали (по чертежу детали);

$\delta_3 = 0,010 \text{ мм}$  – допуск на неплоскостность отсчетной плоскости (по чертежу детали);

$l_{i-k} = 70 \text{ мм}$  – расстояние между средними сечениями призм;

$L = 30 \text{ мм}$  – длина измерения (между I и II положениями).

#### 4.2. Погрешность измерительного приспособления

Погрешность измерительного приспособления возникает из-за:

- несовершенства схемы измерительного приспособления,
- неточности изготовления и сборки,
- неточности элементов базирования и крепления детали,
- непропорциональности перемещения звеньев из-за наличия зазоров в опорах,
- температурных и силовых деформаций элементов приспособления и измеряемой детали,
- неточности отсчета, связанной, в частности, с параллаксом,
- неточности используемого измерительного преобразователя и др.

В общем виде результирующую погрешность измерительного приспособления  $\Delta_{ИП}$  можно представить следующим образом

$$\Delta_{ИП} \supset \Delta_{cx} + \Delta_m + \Delta_s + \Delta_o + \Delta_n ,$$

где  $\Delta_{cx}$  – погрешность схемы передаточного механизма измерительного приспособления;  $\Delta_m$  – технологическая погрешность;  $\Delta_s$  – эксплуатационная погрешность;  $\Delta_o$  – погрешность отсчета;  $\Delta_n$  – погрешность преобразователя (измерительной головки), если она не учтена при расчете методической составляющей погрешности измерения.

#### 4.2.1. Погрешность схемы

Погрешность схемы измерительного приспособления обусловлена применяемым в приспособлении передаточным механизмом. В качестве первичного преобразователя (для преобразования прямолинейного перемещения во вращательное) могут быть использованы элементы синусного или тангенсного механизма, а также их комбинации. Синусный механизм получается при плоской поверхности контакта поступательно движущего элемента, а тангенсный при сферической его поверхности.

Погрешность схемы измерительного приспособления можно определить как разность

$$\Delta_{cx} = l_{cx}(x_i, r_i) - l_0(x), \quad a \leq x \leq b ,$$

где  $l_{cx}(x_i, r_i)$  — функция преобразования, обусловленная схемой передаточного механизма;  $l_0(x)$  — требуемая точная функция преобразования передаточного механизма;  $r_i$  – параметры механизма (геометрические величины, определяющие размеры и взаимное положение отдельных элементов);  $i$  – номер элемента;  $x$  – измеряемая величина;  $a, b$  – нижний и верхний пределы измерений.

Методика расчета погрешности, обусловленной схемой измерительных устройств, и числовые примеры изложены в [6 – см. рекомендуемую литературу].

• Оценим погрешность схемы передаточного механизма, который будем использовать в измерительном приспособлении для нашего примера. В качестве передаточного механизма, исходя из конструктивных соображений, используем синусно-тангенсную передачу (рис.4).

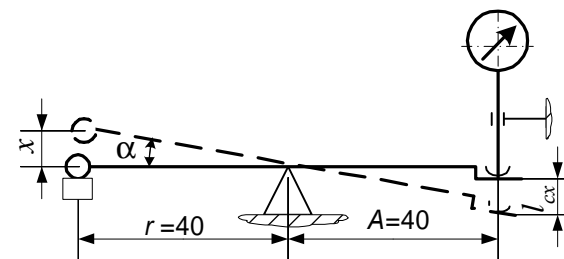


Рис.4. Схема синусно-тангенсной передачи

Исходя из схемы, величина входного сигнала:  $x = r \cdot \sin \alpha$ .  
Отсюда:  $\sin \alpha = x/r$ ;  $\alpha = \arcsin x/r$ .

Величина выходного сигнала:

$$l_{cx} = A \cdot \operatorname{tg} \alpha = A \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = A \frac{\sin \alpha}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha}}.$$

После подстановки получим:

$$l_{cx} = A \frac{x}{r \sqrt{1 - \frac{x^2}{r^2}}} = A \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}}.$$

Учитывая, что требуемая точная функция преобразования передаточного механизма определяется из соотношения  $l_o = \frac{A}{r} x$ , получим формулу для расчета погрешности схемы:

$$\Delta_{cx} = l_{cx} - l_o = \frac{A \cdot x}{\sqrt{r^2 - x^2}} - \frac{A \cdot x}{r}.$$

Погрешность схемы, рассчитанная по полученной формуле, при исходных данных:  $r = A = 40$  мм;  $x = 1,00$  мм ( $0 \leq x \leq 2$  мм) составляет:

$$\Delta_{cx} = \frac{A \cdot x}{\sqrt{r^2 - x^2}} - \frac{A \cdot x}{r} = \frac{40 \cdot 1,00}{\sqrt{40^2 - 1^2}} - \frac{40 \cdot 1,00}{40} = 0,000325 \text{ мм} = 0,3 \text{ мкм}.$$

#### 4.2.2. Технологическая погрешность

При определении технологической погрешности приспособления следует принимать во внимание лишь те первичные погрешности изготовления элементов приспособления, которые влияют на выходную величину – перемещение подвижного элемента отсчетного устройства.

Поскольку математическое описание измерительного приспособления известно, т.е. известна функция преобразования, то технологическую погрешность можно рассчитать по формуле

$$\Delta_m = \sum_{i=1}^n \frac{\partial l_{cx}}{\partial r_i} \cdot \Delta r_i,$$

где  $l_{cx}$  – функция преобразования, обусловленная схемой передаточного механизма;  $\Delta r_i$  – погрешность изготовления деталей измерительного приспособления.

Здесь использован метод алгебраического суммирования, поскольку составляющие погрешности вызываются одной и той же причиной – погрешностью изготовления деталей измерительного приспособления.

• Произведем расчет технологической погрешности, обусловленной неточностью изготовления и сборки деталей передаточного механизма приведенного на рис.4.

На длину плеч  $r$  и  $A$  рычагов устанавливаем допуск  $0,1$  мм.

Тогда:

$$\begin{aligned} \Delta_m &= \frac{\partial l_{cx}}{\partial A} \cdot \Delta A + \frac{\partial l_{cx}}{\partial r} \cdot \Delta r = \left( \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}} \right) \cdot \Delta A - \left( \frac{Ax(1-2x)}{2 \cdot \sqrt{(r^2 - x^2)^3}} \right) \cdot \Delta r = \\ &= \left( \frac{1,0}{\sqrt{40^2 - 1,0^2}} \right) \cdot 0,1 - \left( \frac{40 \cdot 1,0 \cdot (1 - 2 \cdot 1,0)}{2 \cdot \sqrt{(40^2 - 1,0^2)^3}} \right) \cdot 0,1 = 0,00253 \text{ мм} = 2,53 \text{ мкм} \end{aligned}$$

#### 4.2.3. Эксплуатационная погрешность

Группа эксплуатационных погрешностей, возникающих в результате эксплуатации измерительного прибора, является наиболее многочисленной. Источниками появления поэлементных эксплуатационных погрешностей могут быть:

– отличие условий эксплуатации от нормальных: непостоянство температурного режима (температуры помещений, приспособления, деталей), влажности, атмосферного давления, наличие загрязнений, недостаточное время прогрева электросхемы, наличие посторонних источников вибрации и других помех;

– силовые деформации, вызывающие упругие перемещения и перемещения в пределах зазоров, непостоянство измерительного усилия во времени вследствие гистерезиса пружин, упругого последствия, непостоянства сил трения, несбалансированности отдельных деталей приспособления, динамических нагрузок и т.д.;

– контактные деформации, зависящие от измерительного усилия, шероховатости контролируемой поверхности, формы чувствительного

элемента приспособления и формы детали;

– изнашивание наконечников, подвижных частей деталей передаточных и масштабных механизмов, штоков, рычагов, подвижных частей преобразователей, электрических контактов, элементов подвесок, базирующих элементов, подвижных частей и т.п.;

– непостоянство характеристик источников питания (напряжения, частоты, давления и т.п.). Кроме того, возможно появление грубых отклонений в виде: попадания под наконечники крупных частиц абразива, металла, загрязнений, появление заеданий, поломок и т.п.

Результирующая величина эксплуатационной погрешности может быть определена установлением математических зависимостей составляющих погрешностей от факторов их определяющих и использованием метода суммирования. При этом целесообразно ограничить вычисление результирующей погрешности определением основных составляющих. Многие из этих погрешностей при рассмотрении конкретного измерительного прибора оказывают незначительное влияние на результирующую погрешность, кроме того, в каждом конкретном случае может быть свой комплекс доминирующих эксплуатационных погрешностей.

Поскольку в рамках рассматриваемых указаний нет возможности привести исчерпывающие сведения о методах оценок всех составляющих эксплуатационной погрешности, то при необходимости следует обратиться к нормативной, справочной или учебной литературе. Например, методы расчета температурных погрешностей подробно изложены в [7]; расчеты погрешностей, возникающих из-за наличия зазоров в опорах, направляющих вращательного и поступательного перемещений, подробно изложены в работах [1, 8]; погрешности, связанные с упругими перемещениями элементов измерительного приспособления, а так же с контактными деформациями можно оценить, воспользовавшись расчетными схемами и формулами технических справочников.

Ниже рассмотрены наиболее часто имеющие место эксплуатационные погрешности.

#### – Температурная погрешность

Данная погрешность присутствует практически при всех измерениях размеров, и влияние ее обычно растет при увеличении требований к точности и уменьшении измеряемого размера. Поскольку размеры детали и измерительного приспособления изменяются под влияни-

ем температуры, то при нормировании требований к точности размеров принято измерять значение размеров при температуре 20°C (нормальная температура). Если измерения производятся при другой температуре, то размер надо «привести» к этой температуре.

Привести размер к 20°C не всегда возможно, следовательно появится погрешность из-за температурных деформаций. Для установления причин появления погрешности от температурных деформаций представим схему измерения линейного размера в виде размерной измерительной цепи. Причинами возникновения температурных деформаций отдельных звеньев размерной измерительной цепи являются:

- отклонения температуры звеньев от 20°C;
- разность температуры измерительного приспособления и детали;
- непостоянство температуры звеньев в процессе измерений;
- нагрев средства измерения руками оператора.

Погрешность из-за отклонений температуры окружающей среды от 20°C можно исключить, если в условиях постоянной температуры, отличающейся от 20°C при настройке средства измерения использовать установочную меру из такого же материала, что и измеряемая деталь.

Разность температуры средств измерений и объектов измерений вносит погрешность в результаты измерений, если деталь не приняла температуру окружающей среды в месте измерения после ее обработки или перемещения из помещения с другой температурой. При известном температурном режиме  $J_t$  (см. п. 2.3.) погрешность от температурных деформаций  $\Delta_t$  определяется по формуле

$$\Delta_t = 11,6 \cdot 10^{-6} \cdot l \cdot \vartheta_t,$$

где  $l$  – измеряемый параметр.

Нагрев прибора руками оператора характерен для накладных средств измерений. Особенностью этих средств измерений в отношении температурных деформаций заключается в том, что при их использовании они периодически находятся в контакте с источником тепла – руками оператора. При этом происходит нагрев отдельных элементов за счет теплопроводности. Установлено, что такие средства измерений как штангенинструменты практически не чувствительны к нагреву руками оператора. Погрешность средств измерений, корпус которых сделан в виде скобы (микрометры, скобы рычажные и индикаторные), а также накладных нутромеров значительна. Для уменьшения данной погрешности накладные приборы оснащаются теплоизо-

ляционными накладками.

Данные [7] показывают, что если при пользовании накладными приборами руки оператора располагаются на накладках, то погрешность прибора от температурных деформаций, от тепла рук, сокращается в 3...4 раза. Поэтому при пользовании накладными приборами необходимо держать их за накладки, а если они отсутствуют – принимать меры для теплоизоляции скоб от тепла рук оператора.

#### – Погрешность от силовых деформаций

Схема измерения линейных размеров представляет собой измерительную размерную цепь, замыкающим звеном которой является измеряемый размер, а отсчетное устройство – компенсационным звеном. Для надежного замыкания размерной цепи необходимо вводить устройство, создающее усилие в цепи. Это усилие называется измерительным усилием. Измерительное усилие и его непостоянство на всем диапазоне измерений приводит к возникновению следующих погрешностей:

- погрешность от упругих деформаций элементов измерительного прибора и элементов поверхностей измеряемых деталей;
- погрешность от контактных деформаций;
- погрешность от перемещений в пределах зазоров.

Под воздействием измерительного усилия, веса средства измерений и измеряемой детали возникают упругие перемещения элементов измерительного приспособления или детали, которые приводят к погрешности измерения. Измерительное усилие, приложенное к измеряемой детали, расположенной консольно или на двух опорах, а также к детали из мягкого материала и тонкостенной, может вызвать прогиб детали. Величина погрешности измерений при этом равна значению деформации элемента прибора или детали под действием нагрузки и определяется по формулам сопротивления материала.

При измерении детали, помещаемой под измерительный наконечник без его арретирования, т. е. когда деталь проталкивается под наконечником, чтобы выявить экстремальную точку у цилиндрического элемента, также появляется погрешность измерения. При таких измерениях возникает радиальная составляющая усилия на измерительный стержень и происходит деформация установочных узлов. В месте контакта измерительного наконечника с поверхностью измеряемого элемента детали под действием измерительного усилия происходит сжатие контактируемых поверхностей. Значение этой деформации зависит

от вида контакта, от значения действующего усилия, от материала измеряемой поверхности и неровностей поверхности. При измерениях могут применяться три вида контакта измерительного наконечника и детали в точке их контакта: в точке, по линии и по плоскости. Наиболее распространенный вид контакта – в точке. Значение возникающей деформации может быть рассчитано по известным в сопротивлении материала формулам Герца, по полуэмпирическим формулам [1], по номограммам. Например, для наиболее распространенного случая контакта (сферический наконечник и плоская деталь) рекомендуется формула [2]:

$$\Delta_k = 0,43k \cdot \sqrt[3]{\frac{F^2}{r}},$$

где  $\Delta_k$  – контактная деформация, *мкм*;  $r$  – радиус измерительного наконечника, *мм*;  $F$  – измерительное усилие, *H*;  $k$  – коэффициент, зависящий от материала измерительного наконечника: для наконечника из стали  $k = 1$ , из корунда  $k = 0,86$ , из твердого сплава  $k = 0,81$ .

Для уменьшения погрешностей от перемещений в пределах зазоров при разработке схемы измерительного прибора необходимо соблюдать принцип Аббе, в соответствии с которым минимальные погрешности измерения возникают, если контролируемый геометрический элемент и элемент сравнения находятся на одной линии – линии измерения.

- Произведем расчёт эксплуатационной погрешности для рассматриваемого примера.

Эксплуатационная погрешность включает температурную погрешность измерения и составляющие погрешности от силовых деформаций:

$$\Delta_{\text{э}} \supset \Delta_t + \Delta_{\text{упр}} + \Delta_k + \Delta_s,$$

где  $\Delta_t$  – температурная погрешность;  $\Delta_{\text{упр}}$  – погрешность от упругих деформаций;  $\Delta_k$  – погрешность от контактных деформаций;  $\Delta_s$  – погрешность от перемещения в пределах зазора.

#### – Температурная погрешность

В нашем примере, при известном температурном режиме  $\theta_t=0,3^\circ\text{C}$  (см. п.2.3. пример) и длине нормируемого участка  $l = 40$  *мм* (рис.1) погрешность температурных деформаций равна:

$$\Delta_t = 11,6 \cdot 10^{-6} \cdot l \cdot \theta_t = 11,6 \cdot 10^{-6} \cdot 40 \cdot 0,36 = 0,167 \cdot 10^{-3} \text{ мм} = 0,167 \text{ мкм.}$$

### – Погрешность от упругих деформаций

Погрешность от упругих деформаций определяем по формулам сопротивления материалов.

$$\Delta_{упр} = \frac{Fl^3}{3EJ_x} = \frac{2 \cdot 40^3 \cdot 10^{-9}}{3 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 2,73 \cdot 10^{-9}} = 0,078 \text{ мкм},$$

где  $E_{\text{стали}} = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$  – модуль упругости;  $F = 2 \text{ Н}$  – усилие, приложенное к концу рычага (см. паспортные данные для выбранной измерительной головки);

$J_x = \frac{bh^3}{12} = \frac{0,008 \cdot 0,016^3}{12} = 2,73 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4$  – момент инерции рычага прямоугольного сечения ( $b$  и  $h$  выбираем конструктивно).

Как видим из полученного результата, погрешность от упругих перемещений мала, поэтому ею можно пренебречь.

### – Погрешность от контактных деформаций

Погрешность от контактных деформаций необходимо учитывать в передаточном механизме, начиная от чувствительного элемента и заканчивая измерительной головкой.

Рассчитаем погрешность от контактных деформаций  $D_k$  (мкм) в месте контакта шарика синусно-тангенсного рычага с деталью:

$$\Delta_k = 0,43 \cdot k \cdot \sqrt[3]{\frac{F^2}{r}} = 0,43 \cdot 1 \cdot \sqrt[3]{\frac{2^2}{2}} = 0,5418 \text{ мкм},$$

где  $r = 2 \text{ мм}$  – радиус шарика;  $F = 2 \text{ Н}$  – измерительное усилие;  $k = 1$  – для наконечника из стали.

### – Погрешность от перемещения в пределах зазора

Так как в передаточном механизме измерительного приспособления плечи разноименные, то установку синусно-тангенсного рычага в приспособлении необходимо осуществить таким образом, чтобы плечо  $r$  в процессе эксплуатации сохраняло свою длину постоянной. Это возможно, если установку рычага осуществить по приведенной схеме (рис. 5).

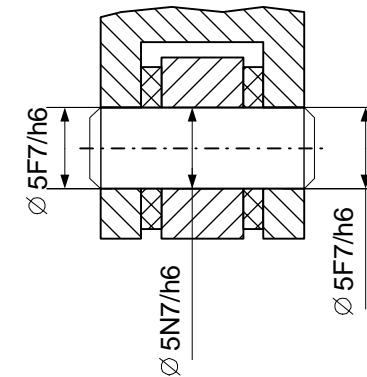


Рис.5. Схема установки рычага

Поворот рычага обеспечивается за счет зазора между осью и отверстием корпуса в соответствии с посадкой  $\text{Ø}5\text{F}7/\text{h}6$ .

Наибольший предельный зазор, исходя из посадки, составляет:

$$S_{max} = ES - ei = 0,022 - (-0,008) = 0,03 \text{ мм}.$$

Перемещение рычага в пределах зазора  $S_{max} = 0,03 \text{ мм}$  приведет к изменению величины плеча  $A$  на величину  $\Delta A$ , равную  $S_{max}/2$ , причем плечо  $A$  будет меняться от  $39,985 \text{ мм}$  до  $40,015 \text{ мм}$ .

Погрешность в пределах зазора при максимальном перемещении измерительного наконечника  $x = 1 \text{ мм}$  будет равна:

$$\Delta_s = \frac{\partial l_{cx}}{\partial A} \Delta A = \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}} \Delta A = \frac{1}{\sqrt{40^2 - 1^2}} 0,015 = 3,75 \cdot 10^{-4} \text{ мм} = 0,375 \text{ мкм}.$$

### 4.2.4. Погрешность отсчета

Погрешность отсчета складывается из погрешностей шкального механизма (погрешностей изготовления шкалы и ее установки в корпусе прибора, погрешности смещения оси вращения циферблата вследствие наличия зазоров в опорах) и ошибок оператора, которые обусловлены явлением параллакса и неточностью совмещения указателя со штрихами шкалы [1]. Перечисленные погрешности, сумма которых составляет полную абсолютную погрешность отсчета, дают представление о возможных погрешностях шкальных устройств.

Наиболее значимой составляющей погрешности отсчета является погрешность параллакса (рис.6). Погрешность параллакса – это погрешность, возникающая вследствие визирования стрелки, расположенной на некотором расстоянии от поверхности шкалы, в направлении, перпендикулярном поверхности шкалы:

$$\Delta_{\text{пар}} = \frac{y \cdot z}{l},$$

где  $\Delta_{\text{пар}}$  - погрешность параллакса, мм,  $y$  - расстояние между плоскостями шкалы и стрелки;  $z$  - смещение глаза наблюдателя в плоскости, параллельной шкале;  $l$  - расстояние от глаза наблюдателя до стрелки ( $l = 250 \div 300$  мм).

При  $l = 250$  мм (для человека с нормальным зрением) погрешность  $\Delta_{\text{пар}} = 0,004yz$ . По опытным данным  $z$  достигает примерно 30 мм, т.е.  $\Delta_{\text{пар}} = 0,12y$ .

Полученное значение  $\Delta_{\text{пар}}$  (мм) необходимо пересчитать в мкм в зависимости от интервала деления и цены деления шкалы.

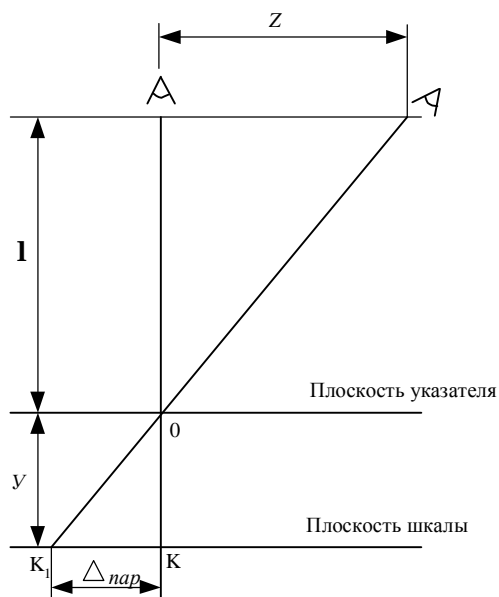


Рис. 6. Схема расчета погрешности параллакса

- В нашем примере погрешность от параллакса  $\Delta_{\text{пар}}$  равна:

$$\Delta_{\text{пар}} = \frac{y \cdot z}{l} = \frac{2 \cdot 30}{250} = 0,24 \text{ мм шкалы},$$

где  $y = 2$  мм – расстояние между плоскостями шкалы и указателя (стрелки);  $z = 30$  мм – смещение глаза наблюдателя в плоскости, параллельной шкале;  $l = 250$  мм - расстояние от глаза наблюдателя до указателя.

Полученное значение  $\Delta_{\text{пар}}$  пересчитаем в мкм.

Учитывая, что для 2МИГ: цена деления  $c = 0,002$  мм; число делений шкалы  $n = 200$ ; диаметр шкалы  $D = 70$  мм, найдем длину деления шкалы:

$$a = \frac{\pi \cdot D}{n} = \frac{3,14 \cdot 70}{200} = 1,1 \text{ мм}.$$

Определим приведенную погрешность параллакса (отсчета)

$$\Delta_o = \Delta_{\text{пар}} = \frac{\Delta_{\text{пар}} \cdot c}{a} = \frac{0,24 \cdot 2}{1,1} = 0,44 \text{ мкм}.$$

#### 4.2.5. Погрешность измерительного преобразователя

В конструкциях измерительных приспособлений для измерения линейных и угловых величин чаще всего используются стандартные измерительные преобразователи - головки и индикаторы, например, головки измерительные с пружинным механизмом типа ИГП, ИГПУ, ИГПР, 11509, ИПМ, ИПМУ, ИПМП, 10301, головки измерительные с рычажно-зубчатым механизмом типа ИГ, МИГ, ИРБ, ИРБ-1, ИРЗП или индикаторы часового типа ИЧ-2, ИЧ-5, ИЧ-10, ИЧ-25, ИЧ-50, ИТ и др.

Погрешности этих преобразователей  $\Delta_n$  приводятся в паспортных данных, каталогах или справочниках, например [2, 4].

- Для рассматриваемого примера выбрана многооборотная измерительная головка 2МИГ (см. п.3.4.), погрешность которой равна  $\Delta_1 = 0,003$  мм (см. расчет методической составляющей погрешности измерения).

### 4.3. Субъективные погрешности

К субъективным погрешностям, зависящим от оператора, можно отнести следующие виды погрешности:

– субъективные погрешности присутствия – погрешности, проявляющиеся в виде влияния теплоизлучения оператора на температуру окружающей среды; субъективная погрешность учитывается при расчете температурной составляющей погрешности измерения.

– субъективные погрешности действия вносятся оператором при настройке измерительного приспособления, при перемещении приспособления относительно детали или детали относительно приспособления, например, при измерении внутренних размеров;

– профессиональные субъективные погрешности – зависят от квалификации оператора.

Наиболее существенное влияние на погрешность измерения оказывают субъективные погрешности действия и профессиональные. Подробные сведения об учете этих составляющих можно найти в [11].

• Так как полностью учесть все виды субъективных составляющих погрешности измерения не представляется возможным, поскольку их значения существенно зависят от квалификации оператора, опыта его работы и т.п., то принимаем  $\Delta_c = 0$ .

### 4.4. Определение результирующей погрешности измерения

Для определения оценки результирующей погрешности измерения должны учитываться взаимные корреляционные связи различных составляющих погрешности. Поэтому исходными данными для более точного расчета должны служить оценки именно всех отдельных составляющих погрешности, а не оценки некоторых суммарных погрешностей (суммарная методическая погрешность, суммарная эксплуатационная погрешность и т.п.).

Оценку результирующей погрешности измерения осуществляют методом суммирования составляющих погрешностей, основанным на алгебраическом или геометрическом сложении. Выбор способа суммирования (складывать алгебраически или геометрически) зависит от того, являются ли суммируемые погрешности коррелированными или независимыми. Коррелированные погрешности складываются алгебраически, а независимые – геометрически. К первому виду относятся

те погрешности, которые вызываются одной и той же причиной (например, технологические погрешности, обусловленные неточностью изготовления размеров передаточных звеньев), когда тесные корреляционные связи просматриваются логически. Погрешности же, между которыми такие взаимосвязи не обнаруживаются, относятся к независимым.

Результирующую погрешность измерения  $\Delta_{изм}$  следует сравнить с допустимой  $\delta_{изм}$ . При выполнении неравенства  $\Delta_{изм} \leq \delta_{изм}$  спроектированное измерительное приспособление обеспечивает получение результата измерения с погрешностью не более допустимой. Если  $\Delta_{изм} > \delta_{изм}$ , то необходимо уточнить составляющие погрешности. Если уточнение не приводит к желаемому результату, следует усилить ограничения на колебание значений влияющих величин, разработать новый метод или спроектировать новое измерительное приспособление.

Сравнение результирующей погрешности измерения с допускаемой нужно проводить до тех пор, пока не будет  $\Delta_{изм} \leq \delta_{изм}$ .

• Определим суммарную погрешность измерения для нашего примера. При расчете суммарной погрешности измерения независимые составляющие погрешности складываются геометрически, а коррелированные складываются алгебраически.

Имеем:  $\Delta_m = 9,2$  мкм,  $\Delta_{cx} = 0,3$  мкм,  $\Delta_m = 2,53$  мкм,  $\Delta_s = 0,375$  мкм,  $\Delta_t = 0,167$  мкм,  $\Delta_{ypr} = 0,078$  мкм,  $\Delta_k = 0,54$  мкм,  $\Delta_o = 0,44$  мкм.

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_m^2 + (\Delta_{cx} + \Delta_m + \Delta_s)^2 + \Delta_t^2 + (\Delta_{ypr} + \Delta_k)^2 + \Delta_o^2} = \\ = \sqrt{9,2^2 + (0,3 + 2,53 + 0,375)^2 + 0,167^2 + (0,078 + 0,54)^2 + 0,44^2} = 9,77 \text{ мкм.}$$

Допускаемая погрешность для данного приспособления равна  $\delta = 16$  мкм (см. п. 1.2.), а суммарная погрешность получилась  $\Delta_{\Sigma} = 9,77$  мкм, следовательно, приспособление удовлетворяет требованиям точности и может быть использовано для измерений.

## 5. Конструкторские расчеты

В этом разделе пояснительной записки следует привести расчеты, связанные непосредственно с конструкцией измерительного приспособления. В первую очередь – это кинематические, силовые, а в некоторых случаях и прочностные расчеты. Кроме того, могут быть приведены расчеты оригинальных деталей, сборочных единиц механизмов (валов, муфт, опор), функциональных элементов измерительного приспособления (пружин, чувствительных элементов, базирующих и установочных элементов, отсчетных устройств, фиксаторов, направляющих), или механических соединений [1, 8].

Расчеты должны выполняться на базе знаний, полученных из других дисциплин общеинженерного цикла: математики, физики, теоретической механики, сопротивления материалов, технологии конструкционных материалов, деталей машин и др.

## 6. Графическая часть

В графической части должен быть представлен сборочный чертеж измерительного приспособления с необходимыми видами, разрезами, сечениями. На чертеже должны быть проставлены габаритные, установочные и посадочные размеры. Соединения деталей должны быть обозначены посадками по ЕСДП.

В правом нижнем углу (над основной надписью) необходимо привести технические условия на приспособление и его краткую метрологическую характеристику [4, 5, 13]. Чертеж и спецификация к нему должны быть оформлены в соответствии с ЕСКД.

## Список литературы

1. Вopilкин Е.А. Расчет и конструирование механизмов приборов и систем. Учебное пособие М., "Высшая школа", 1980г.
2. Городецкий Ю.Г. Конструкции, расчет и эксплуатация измерительных инструментов и приборов. Изд-во М.: Машиностроение, 1971. – 376 с.
3. Допуски и посадки. Справочник. В 2-х ч. / Мягков В.Д. и др. - Л.: Машиностроение, 1983г. ч.1.
4. Иванов А.Г. Измерительные приборы в машиностроении. Учебное пособие. М.: Издательство стандартов, 1981, -496 с.
5. Контроль взаимного расположения поверхностей в корпусных деталях и деталях тел вращения. Методические рекомендации. Москва. НИИМАШ, 1972. – 112 с.
6. Метрологическое обеспечение технологических процессов изготовления изделий в машиностроении: Учебное пособие / Н.П Солнышкин, С.И. Дмитриев, Л.В. Дашков; Под. общ. ред. Н.П. Солнышкина – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002 – 198 с.
7. Марков Н.Н., Сацердотов П.А. Погрешности от температурных деформаций при линейных измерениях. – М.: Машиностроение, 1976г.
8. Милосердин Ю.В. и др. Расчет и конструирование механизмов приборов и установок. М.: Машиностроение, 1985г. – 408с.
9. Обработка металлов резанием: Справочник технолога / А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм и др. Под общ. ред. А. А. Панова – М.: Машиностроение, 1988. – 736 с.
10. Правила оформления студенческих выпускных работ и отчетов. Положение. Сост.: Г.П.Голованов, К.К. Гомоюнов, В.А. Дяченко и др. Под ред. В.В. Глухова. Спб.: СПбГТУ, 1998. – 32с.
11. Селиванов М.Н. и др. Качество измерений: Метрологическая справочная книга. - Л.: Лениздат, 1987. -295с.
12. Схиртладзе А. Г. Технологическая оснастка машиностроительных производств. Альбом. Уч.пособие в 2-х частях. М.: Изд-во МГТУ, «Станки», 1999.
13. Шубников К.В. и др. Унифицированные переналаживаемые средства измерения. - Л.; "Машиностроение" (Ленинградское отделение). 1978. 200с.
14. Якушев А.И. и др. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: Учебник для вузов – М.: Машиностроение, 1986. – 352с.

## Содержание

Введение.....	3
Рабочая программа дисциплины «Метрологическое обеспечение производства».....	3
Вопросы для самопроверки.....	7
Общие указания по выполнению курсовой работы.....	11
Содержание пояснительной записки.....	12
1. Анализ поставленной измерительной задачи.....	13
1.1. Установление перечня измеряемых размерно-геометрических параметров детали.....	13
1.2. Расчет допускаемой погрешности измерения.....	14
2. Установление условий проведения измерения.....	16
2.1. Нормальные условия проведения измерений.....	16
2.2. Установление области допустимых отклонений основных влияющих величин.....	17
2.3. Расчет температурного режима измерений.....	20
3. Выбор и обоснование метода и схемы измерения.....	21
3.1. Выбор и обоснование метода измерения.....	21
3.2. Разработка схемы измерительного приспособления.....	22
3.3. Разработка измерительного приспособления.....	24
3.4. Выбор стандартной измерительной головки.....	24
4. Расчет погрешности измерения.....	25
4.1. Погрешность метода измерения.....	25
4.2. Погрешность измерительного приспособления.....	26
4.2.1. Погрешность схемы.....	27
4.2.2. Технологическая погрешность.....	29
4.2.3. Эксплуатационная погрешность.....	30
4.2.4. Погрешность отсчета.....	36
4.2.5. Погрешность измерительного преобразователя.....	38
4.3. Расчет субъективной погрешности.....	38
4.4. Определение результирующей погрешности измерения.....	39
5. Конструкторские расчеты.....	40
6. Графическая часть.....	41
Список литературы.....	42

Учебное издание

Ершова Ирина Глебовна  
Дмитриев Сергей Иванович

### **РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ**

Методические указания по выполнению курсовой работы  
по дисциплине

**“Метрологическое обеспечение производства”**

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 14.01.2005

Формат 60×84/16

Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,3

Тираж экз. 50

Заказ №

Издательство СПбГТУ

Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

