



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Приборостроение»

Учебное пособие
по дисциплине

«Точность измерительных приборов»

Автор
Ананченко В.Н.

Ростов-на-Дону, 2015



Аннотация

В учебном пособии рассмотрены вопросы точности и надежности результатов измерения и контроля; описаны проблемы обеспечения точности при проектировании измерительных устройств: причины появления погрешностей измерительных устройств, методы учета влияния неточностей приборов и способы уменьшения погрешностей.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению "Приборостроение".

Автор

к.т.н., профессор Ананченко В.Н.



Оглавление

Введение	7
1. Цель изучения теории точности измерительных устройств.....	8
2. Сведения о развитии теории точности	11
3. Общие понятия, относящиеся к измерительным устройствам	14
4. Математическое описание ИУ	15
5. Показатели точности ИУ	23
6. Систематизация видов погрешностей ИУ	30
7. Принципы установления первичных погрешностей ИУ	32
8. Погрешности показаний, обусловленные схемой пневматических ИУ	41
9. Погрешности показаний, обусловленные схемой электрических ИУ	46
10. Влияние векторных первичных погрешностей на показания ИУ	54
11. Задачи по точности при дифференциальной форме зависимости между входом и выходом ИУ	63
12. Унифицированная информационно-измерительная система метрологического обеспечения качества	67
13. Надежность средств измерений.....	84
14. Метрологическая служба. Основные сведения	89
15. Государственная система эталонов единиц измерений	92

Точность измерительных приборов

16. Государственные испытания	99
17. Стандартизация методик выполнения измерений ...	102
18. Метрологическая служба предприятий	104
19. Требования к внешним условиям при измерениях ..	105
20. Поверочные схемы	109
21. Международная метрологическая работа	113
22. Определение физических констант и характеристик веществ и материалов	114
23. Сведения о возможностях современной метрологии в области измерений некоторых физических величин	117
24. Применение луча лазера в метрологии	119
25. Эффект Мессбауэра и возможности его применения в метрологии	126
26. Температурные и теплофизические измерения	132
27. Интерскопия	133
28. Применение химотроники в метрологии	134
29. Влияние погрешности измерения на результаты контроля.....	135
30. Допуск изделия и приемочный допуск.....	138
31. Влияние погрешностей измерения на результаты разбраковки(пассивный контроль)	140
32. Пассивный контроль размеров, распределенных по нормальному закону	146
33. Активный контроль размеров при изготовлении по методу пробных проходов.....	156
34. Автоматический контроль размеров	159
35. Значение коэффициента точности контроля,	

Точность измерительных приборов

применяемые на практике	162
36. Основные принципы(положения) прикладной метрологии	165
37. Предмет теории точности измерительных устройств	167
38. Развитие науки о точности измерительных устройств	171
39. Причины появления погрешностей ИУ	182
40. Аналитический метод определения погрешности схемы ИУ	186
41. Регулирование ИУ	194
42. Экспериментальное определение погрешности схемы ИУ.....	200
43. О рациональном построении передающих рычагов измерительных приборов.....	203
44. Линеаризация характеристики и определение наивыгоднейших параметров ИУ	209
45. Первичная погрешность механизма	218
46. Действующая погрешность механизма	224
47. Основные уравнения кинематики неточного механизма	228
48. Примеры определения погрешности положения механизма методом плеча и линии действия	240
49. Дифференциальный метод определения погрешностей ИУ.....	245
50. Определение погрешностей методом преобразования схемы.....	249

Точность измерительных приборов

51. Геометрический метод определения погрешности механизма	264
52. Определение погрешностей механизма методом планов малых перемещений	272
53. Метод относительных погрешностей	274
54. Сравнение методов определения погрешностей ИУ	281
55. Погрешности, вызванные неточностью направляющих	283
56. Учет влияния зазора во вращательной паре	284
57. Учет влияния погрешностей прямолинейных направляющих	290
Список использованных источников	296

ВВЕДЕНИЕ

Одним из существующих факторов, обеспечивающих высокое качество получаемой продукции, является соблюдение заданной точности исполнения изделия при наличии массовости.

Стремление управлять качеством изделий требует наличия знаний по метрологии, анализа точности ее реализации и возможности контроля.

Развитие промышленности, рост объема выпускаемой продукции, переход многих отраслей промышленности на массовое поточное автоматизированное производство неразрывно связано с вопросами повышения точности и надежности выпускаемой продукции. В связи с этим, проблема правильного и обоснованного назначения допусков на параметры кинематических пар и кинематических цепей становится особенно актуальной. Необходимость обеспечения высоких точностей кинематических цепей металлорежущих станков, приборов, различных передач и следящих систем тесно связаны с разработкой методов точностных расчетов функциональных связей кинематических пар и кинематических цепей механизмов.

Изучение материалов, изложенных в данном учебном пособии, способствуют освоению предусмотренных федеральными образовательными стандартами следующих профессиональных компетенций:

- способность к наладке, настройке, юстировке и опытной проверке приборов и систем;
- способность к оценке технологичности и технологическому контролю простых и средней сложности конструкторских решений, разработке типовых процессов контроля параметров механических, оптических и оптико-электронных деталей и узлов;
- способность к проведению измерений и исследования различных объектов.

Все теоретические положения, рассматриваемые в пособии, сопровождаются большим количеством практических примеров, которые помогают усвоению учебного материала и могут быть полезными в дальнейшем в процессе курсового дипломного проектирования.

1. ЦЕЛЬ ИЗУЧЕНИЯ ТЕОРИИ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Средством измерения (СИ) называется техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства. Для категории средств измерений, охватывающей измерительные приборы и измерительные преобразователи, допускается применять термин измерительное устройство (ИУ).

Основным структурным элементом средства измерений является измерительная цепь, определяемая как совокупность преобразовательных элементов средства измерений, обеспечивающая осуществление всех преобразований сигнала измерительной информации. Измерительный преобразователь (ИП), к которому подведена измеряемая величина, называется первичным измерительным преобразователем. Измерительный преобразователь, занимающий в измерительной цепи место после первичного, называется промежуточным преобразователем.

Сигнал, поступающий на вход средства измерений, т. е. входной сигнал, пройдя через все ступени преобразования, дает на выходе средства измерений выходной сигнал в том или ином виде.

Одним из видов выходного сигнала является показание средства измерений, т. е. значение величины, определяемое по отсчетному устройству и выраженное в принятых единицах этой величины. Зависимость между значениями величины на выходе и входе средства измерений, представленная в виде таблицы, графика или формулы, называется градуированной характеристикой средства измерений. Эта характеристика имеет важное значение при изучении свойств средства измерений. В настоящем курсе эти свойства изучаются лишь в одном аспекте: изучается точность средства измерений как одна из важнейших характеристик его качества, отражающая близость к нулю его погрешностей. Погрешность измерительного прибора есть разность между показанием прибора и истинным значением измеряемой величины. В связи с тем, что истинное значение величины остается неизвестным, на практике вместо него пользуются действительным значением физической величины, которое определяется как значение физической величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному, что для данной цели

Точность измерительных приборов

может быть использовано вместо него. Но если вместо истинного значения измеряемой величины используют её действительное значение, то, следовательно, экспериментально не определяется также и истинное значение погрешности средства измерений. В связи с этим возникает вопрос об оценке величин, характеризующих точность средства измерений, и ряд других вопросов, указанных ниже.

Что следует принять в качестве показателей точности ИУ?

Какова погрешность показаний, обусловленная схемой ИУ и первичными погрешностями измерительной цепи?

Как найти погрешности показаний ИУ, если известны пределы допускаемых первичных погрешностей?

Как найти значения первичных погрешностей, если известна погрешность показаний ИУ?

Как выбрать параметры схемы ИУ, чтобы погрешность показаний, обусловленная схемой, была минимальной?

Как установить экономически целесообразные допуски на первичные погрешности?

Этим, конечно, не исчерпываются вопросы, возникающие при изготовлении и эксплуатации ИУ.

Сложный комплекс вопросов, связанных с точностью ИУ, можно подразделить на четыре направления.

Первое направление — метрология — решает задачи установления системы единиц измерения, создания эталонов и образцовых средств измерений, разработки методов измерений и поверки, организации и осуществления поверки средств измерений.

Второе направление - определение точности ИУ - решает задачи установления системы показателей точности для ИУ в целом и для его элементов, определения погрешностей показаний ИУ, обусловленных схемой, изучения влияния первичных погрешностей ИУ на его показания, овладения методами расчета ИУ по точности в детерминированных и вероятностных условиях.

Третье направление — анализ погрешностей ИУ — решает задачи выявления причин, вызывающих погрешности показаний ИУ, выявления первичных погрешностей ИУ на основании результатов его поверки, овладения методами расчета при анализе погрешностей показаний ИУ.

Четвертое направление — синтез ИУ - решает задачи выбора схемы ИУ и определения его параметров, исходя из требования минимальной погрешности показаний, обусловленной схемой ИУ, установления пределов до-

Точность измерительных приборов

ностей при наименьшей стоимости изготовления ИУ.

Особенно важно овладеть методами расчета на точность по схемам и чертежам будущего объекта - ИУ. Трудно представить себе, чтобы, например, при сооружении моста не рассчитывали его прочность при заданной нагрузке, так и при создании ИУ должна быть известна точность, с которой смогут получать информацию от проектируемого ИУ. Раньше при производстве ИУ затрачивали средства на эксперименты поискового характера и на изготовление различных вариантов образцов с целью выявления того, который будет работать с наибольшей точностью. Теперь на основе теории точности ИУ вопрос о выборе оптимального варианта решают путем расчета на точность по проектам и моделям. Эксперимент остается обязательным, но уже не для поиска, а для практического подтверждения результатов расчета.

2. СВЕДЕНИЯ О РАЗВИТИИ ТЕОРИИ ТОЧНОСТИ

Проблема определения и повышения точности средств измерений стояла всегда, во все времена их существования и применения. В каждой стране требовались единообразие, верность и взаимное соответствие применяемых мер и весов, и на каждом этапе уровень решения этих задач соответствовал уровню развития экономики, науки, техники и социального прогресса общества. В России Депо образцовых мер и весов было создано в 1841 г. в Петербурге.

С введением во Франции метрической системы единиц и мировым признанием этой системы в 1875 г. по инициативе и при деятельном участии русских ученых Б. С. Якоби, Г. И. Вилде и Г. В. Струве была разработана «Метрическая конвенция», подписанная 17 государствами. На общие средства заключивших конвенцию государств было учреждено в г. Севре (близ Парижа) Международное бюро мер и весов для всех стран, подписавших конвенцию. В 1893 г. на базе Депо мер и весов Д. И. Менделеев организовал в Петербурге Главную палату мер и весов. В ней были проведены мероприятия по подготовке к переходу на метрическую систему единиц, изготовлены соответствующие эталоны. Законом от 4 июня 1899 г. в России была допущена метрическая система в необязательном порядке (в качестве обязательной метрическая система была введена лишь 14 сентября 1918 г.).

Для осуществления мероприятий по обеспечению единства измерений потребовались средства измерений высокой точности, что на том этапе достигалось искусством мастеров, изготавливавших меры и измерительные приборы, и осуществлением некоторых теоретических соображений (например, для эталона метра была принята X-образная форма сечения, что создает наибольшее сопротивление изгибу).

В конце XIX века П. Л. Чебышев создал теорию приближения функций, на основании которой разработал методы синтеза механизмов. Способы наилучшего приближения функций применяются и в наше время при решении задач приближенного синтеза ИУ. При этом определяли только те систематические погрешности ИУ, которые обусловлены его схемой. Случайные погрешности параметров устройства и вероятности их появления не учитывали, хотя теоретическая база для этого уже была создана. Зародившаяся во Франции в XVII веке теория вероятностей была развита в России П. Л. Чебышевым, А. М. Ляпуновым и А. А.

Точность измерительных приборов

Марковым. Они поставили новые (для XIX века) задачи и доказали закон больших чисел, центральную предельную теорему для суммы независимых случайных величин, метод определения результата зависимых испытаний. В то время вероятностные характеристики применяли лишь по отношению к погрешностям наблюдения при измерении. Были попытки применить также вопросы теории вероятностей к приемочному контролю изделий, поставляемых для армии.

Использование теории вероятностей при изучении погрешностей ИУ последовало значительно позже (1940 г.). Отметим, что при изучении погрешностей ИУ ранее не использовали также и другие разделы математики, достигшие в XIX веке высокого уровня развития: математический анализ, дифференциальные уравнения, теорию функций, ряды. Применение этих разделов математики оказалось эффективным при дальнейших исследованиях точности ИУ.

В 1918 г. узаконена метрическая система единиц в СССР. В 1919 г. составлен первый проект системы допусков на гладкие цилиндрические соединения. Последовала разработка систем допусков на различные виды соединений: конических, резьбовых и др. В 1931 г. на базе Главной палаты мер и весов создан Всесоюзный институт метрологии и стандартизации (ВИМС).

В 1934 г. на базе ВИМС был организован Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии (ВНИИМ) имени Д. И. Менделеева. На ВНИИМ возложили решение следующих основных задач: разработку единиц физических величин и систем единиц; воспроизведение с наивысшей точностью всех единиц физических величин в виде эталонов (включая также эталонные приборы и установки) и хранение эталонов; разработку рациональных методов и средств передачи значений единиц от эталонов к образцовым мерам и образцовым измерительным приборам: точные определения важнейших физических постоянных; поверку образцовых мер и измерительных приборов, применяемых в различных отраслях народного хозяйства СССР.

В 1935 г. было организовано Научно-исследовательское бюро взаимозаменяемости, ставшее ведущей организацией как по разработке методов и средств измерений в машиностроении, так и при разработке норм допускаемых погрешностей. Развернулись работы по взаимозаменяемости в научно-исследовательских организациях различных отраслей промышленности: тяжелой, станкостроительной, подшипниково-вой и др.

Точность измерительных приборов

В этот же период разрабатываются решения вопросов точности механизмов с учетом систематических и случайных погрешностей изготовления звеньев.

В настоящее время учение о точности развивается в следующих направлениях: 1) нелинейная теория точности; 2) оптимизация систем контроля; 3) обеспечение надежности устройств в смысле сохранения точности при эксплуатации; 4) информационная теория точности.

Выводы теории точности измерительных устройств находят практическое применение через посредство Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ).

3. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ УСТРОЙСТВАМ

Понятие измерительное устройство относится к таким средствам измерений, которые включают измерительные приборы и измерительные преобразователи.

Средства измерений различны по применению заложенных в них физических принципов, по конструкции и назначению, но при всем разнообразии средства измерений обладают некоторыми общими признаками, что открывает возможность для их общего описания, для описания их структурных элементов, параметров и свойств. Все средства измерений предназначены для нахождения экспериментальным путем действительного значения измеряемой величины и выражения ее в принятых единицах измерения. Результат сравнения фиксируется с помощью показывающих, регистрирующих, самопишущих или печатающих устройств. У всех средств измерений можно выявить измерительную цепь, на вход которой действует измеряемая величина. На выходе цепи получают измерительную информацию. Измерительная система может иметь несколько входов и несколько выходов, т. е. несколько измерительных цепей (каналов связи), в таких случаях при решении задач на точность средство измерений исследуют по каждому каналу связи в отдельности. Во многих средствах измерений имеются преобразователи: первичные, промежуточные, передающие и масштабные, вырабатывающие сигнал на выходе измерительной цепи в форме, удобной для передачи и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию, наблюдателя (возможность непосредственного восприятия предусматривается в измерительном приборе). У разнообразных средств измерений можно выявить общие по назначению, но различные по устройству структурные элементы: чувствительные элементы, измерительные механизмы, отсчетные устройства, регистрирующие устройства. Для всех средств измерений устанавливаются определенные параметры, характеризующие данное средство при номинальных значениях этих параметров: диапазон измерений и показаний, длина деления шкалы, цена деления шкалы, градуировочная характеристика, чувствительность. Наконец, для всех средств измерений предусматриваются нормированные метрологические свойства и устанавливаются определенные показатели точности.

4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИУ

Измерительные приборы конструируют так, чтобы изображение значения измеряемой величины воспринималось человеком непосредственно с помощью геометрических, физических или цифровых символов. Наиболее распространенной формой изображения измерительной информации является показание отсчетного устройства средства измерений. Входной сигнал, воспринимаемый чувствительным элементом, после преобразования дает на выходе измерительной цепи информацию, выраженную в форме показания средства измерений. Для изучения свойств средства измерений важно установить в математической форме связь между измеряемой величиной и показанием средства измерений. Если измерительная установка (или система) имеет несколько входов и несколько выходов, то математическое описание ИУ следует дать по каждому каналу связи. Не нарушая общности выводов, достаточно рассмотреть измерительную цепь с одним входом и одним выходом.

Связь между входом и выходом измерительной цепи должна быть рассмотрена по крайней мере в трех аспектах:

- 1) реальные показания, зависящие от схемы и погрешностей параметров ИУ;
- 2) теоретические показания, зависящие от параметров схемы без учета их погрешностей;
- 3) требуемые точные показания, реализуемые средствами поверки ИУ.

Здесь под термином «точные показания» понимаются не идеально точные (воображаемые) показания, а те показания, которые получают с помощью образцовых мер и приборов с присутствующими им погрешностями при поверке данного средства измерений. Понятия «требуемое точное» и «номинальное» близки, но не тождественны, так как первое включает погрешности поверки, второе — не включает их.

Точность измерительных приборов

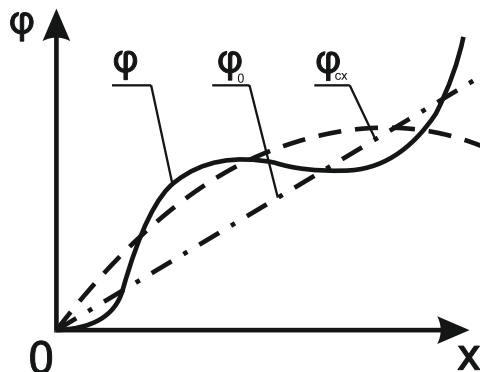


Рис. 1. Зависимость показания ИУ φ от измеряемой величины x

Упомянутые три вида показаний представлены на рис. 1, где реальные показания обозначены φ (без индекса), теоретические показания, обусловленные схемой (без учета погрешностей параметров), $\varphi_{сх}$ и требуемые точные показания φ_0 . Показания ИУ представляют собой функции

$$\varphi = \varphi(x, q_s + \Delta q_s) \quad s=1, 2, 3, \dots, n$$

$$a \geq x \geq b,$$

$$\varphi_{сх} = \varphi_{сх}(x, q_s),$$

$$\varphi_0 = \varphi_0(x),$$

где x - измеряемая величина;

q - теоретическое значение параметра;

Δq - погрешность параметра (первичная погрешность);

s - номер параметра;

n - число учитываемых параметров;

a и b — нижний и верхний пределы измерений.

Для реальной характеристики φ математическое описание может быть составлено по экспериментальным данным с применением математического аппарата теории случайных функций. Характеристика $\varphi_{сх}$ может быть выполнена в общем виде для конкретной схемы ИУ. Требуемая точная характеристика φ_0 выражает закон построения шкалы. На рис. 1 φ_0 соответствует равномерной шкале. Совпадение законов построения $\varphi_{сх}$ и φ_0 может быть достигнуто или выбором соответствующей схемы ИУ, или построением неравномерной шкалы, или установлением непостоянной цены деления шкалы. Совпадение характеристик $\varphi_{сх}$ и φ_0 означает отсутствие погрешностей показаний, обусловленных схемой ИУ.

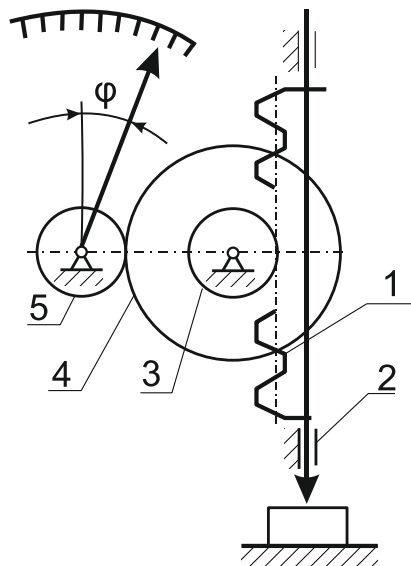


Рис. 2. Схема измерительной цепи индикатора с ценой деления 0,01 мм и диапазоном измерения 0—10 мм: 1 - зубчатая рейка; 2 - корпус; 3 - 5 - зубчатые колеса

Математическое описание ИУ необходимо для выполнения различных расчетов, включая расчеты на точность и расчеты при анализе погрешностей. Способы математического описания ИУ различны. Они зависят от сложности ИУ, условий их работы, а также от того, какие факторы признаются существенными в данной ситуации, а какими пренебрегают ввиду незначительности их влияния. За основу принимают «собственную» характеристику, связывающую вход и выход измерительной цепи, не принимая во внимание динамических факторов (сил, масс, ускорений) и не учитывая погрешностей изготовления. Собственная характеристика дается в состоянии покоя или установившегося движения системы и называется поэтому статической. Она выражается обычно конечным уравнением в явном или неявном виде. Статическая характеристика выражает основные закономерности устройства, несколько отличающиеся от реальных условий работы. Пользуясь статической характеристикой, можно рассчитать теоретические показания ИУ. Более близкой к реальным условиям является динамическая характеристика ИУ, в которой выражены

Точность измерительных приборов

результаты действия сил, масс и ускорений дополнительно к собственной (статической) характеристике.

Математическое описание ИУ составляют не только в виде функции времени. При анализе погрешностей применяют разложение в ряд Фурье, спектральные представления, например, в координатах «спектр амплитуд – частота», преобразование Фурье.

При этом обычно реальные связи заменяют приближенными закономерными связями, принимая тс или иные условия приближения. Наиболее верное отражение действительности дают стохастические методы описания.

Ознакомление с методами математического описания ИУ начнем с примеров описания собственной (статической) характеристики ИУ.

Пример 4.1

Для индикатора с ценой деления 0,01 мм и диапазоном измерений 0—10 мм (рис. 2)

$$\varphi_{сх} = \frac{x z_4}{r_3 z_5} \quad [\text{рад}],$$

где r_3 — радиус делительной окружности зубчатого колеса 3; z_4 и z_5 — числа зубьев колес 4 и 5.

Первичным преобразователем служит зубчатая передача от рейки к колесу (линейная величина преобразуется в угловую).

Масштабным преобразователем служит пара колес 4 и 5. Функция $\varphi_{сх}$ может быть выражена в делениях шкалы:

$$\varphi_{сх} = \frac{x z_4 z_m}{r_3 z_5 \theta} \quad [\text{дел. шкалы}],$$

где z_m — общее число делений шкалы;

θ — угол шкалы, соответствующий z_m .

Наконец, $\varphi_{сх}$ может быть выражена в единицах измеряемой величины, если ввести множитель c . (c — цена деления),

$$\varphi_{сх} = \frac{x z_4 z_m c}{r_3 z_5 \theta}.$$

Функция $\varphi_{сх}$ линейна, шкала равномерная, следовательно, совпадает с φ_0 .

Числовой пример: при $r_3 = 1,592$ мм, $r_4 = 100$, $z_5 = 10$, $z_m = 100$,

$$\theta = 2\pi, \quad c = 0,01 \text{ мм}$$

Точность измерительных приборов

$$\varphi_{\text{сх}} = \frac{x \cdot 100 \cdot 100 \cdot 0,01}{1,592 \cdot 10 \cdot 2\pi} = x [\text{мм}].$$

Пример 4.2

Имеется рычажно-пружинный микромер (микрокатор). Чувствительным элементом служит скрученная лента.

$$\text{Показание прибора } \varphi_{\text{сх}} = kx \frac{z_{\text{ш}}}{\theta} \text{ [дел. шкалы],}$$

где k — отношение угла поворота среднего сечения ленты к перемещению измерительного стержня (это отношение не постоянно);

$z_{\text{ш}}$ — число делений шкалы;

θ — угол шкалы. Значение k вычисляют по формуле

$$k = \frac{k_p}{\frac{1}{k_l} + \frac{\Delta P L_0^3}{3 E_{\sigma} I_0}}$$

где k_p — передаточное отношение рычажной передачи;

k_l — отношение угла поворота среднего сечения ленты к соответствующему изменению длины ленты;

ΔP — жесткость ленты при растяжении;

L_0 — вылет пластинчатой опоры;

E_{σ} — модуль упругости материала пластинчатой опоры;

I_0 — момент инерции сечения пластинчатой опоры. Поскольку параметры k и k_l зависят от x , то $\varphi_{\text{сх}}$ вообще не линейна. Для работы выбирают достаточно близкий к линейному участок градуировочной характеристики.

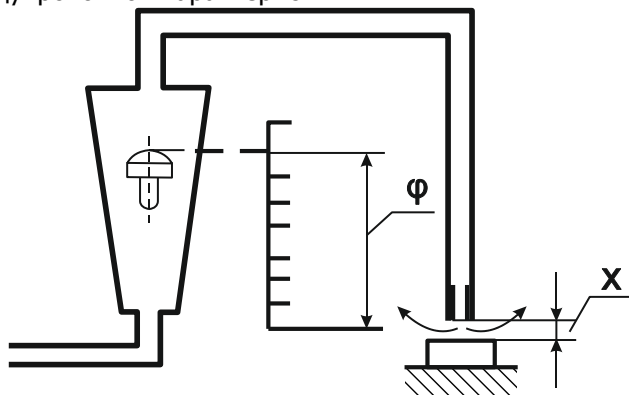


Рис. 3. Принципиальная схема пневматического прибора, реагирующего на изменение скорости воздушного потока

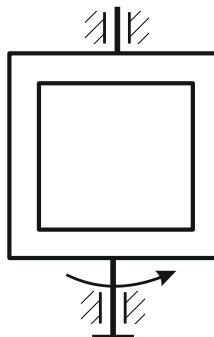


Рис. 4. Рамка гальванометра

Пример 4.3

В пневматическом измерительном приборе, реагирующем на изменение скорости воздушного потока (рис. 3), указателем служит поплавок, по положению которого относительно шкалы будут отсчет.

$$\varphi_{\text{сх}} = \sqrt{2\rho x} \frac{z_m}{L_m} \text{ [дел. шкалы]},$$

где ρ — параметр, зависящий от длины трубки, диаметра, массы и формы поплавка, диаметра выходного сопла, давления воздуха на входе и от других величин;

x — зазор между срезом сопла и измеряемой поверхностью;

z_m — общее число делений шкалы;

L_m — длина шкалы, соответствующая $g_{\text{ш}}$.

Функция $\varphi_{\text{сх}}$ не линейна. При равномерной шкале $\varphi_{\text{сх}}$ и φ_0 будут различными.

Пример 4.4

На рис. 4 представлена схематично рамка гальванометра. Связь между углом поворота рамки φ и вращающим моментом M выражена в переходном режиме дифференциальным уравнением

$$I\ddot{\varphi} + R\dot{\varphi} + C\varphi = M,$$

где I — приведенный момент инерции подвижной системы;

R — успокаивающий момент при скорости вращения 1 рад/с;

C — жесткость пружины.

Пример 4.5

Для индуктивного первичного преобразователя имеется следующая формула в комплексной форме:

$$U_0 = \frac{1}{2} U_1 \left(\frac{r^2 \varepsilon_r + \omega^2 L^2 \varepsilon_1}{r^2 + \omega^2 L^2} + j\omega L r \frac{L \varepsilon - r \varepsilon}{r^2 + \omega^2 L^2} \right),$$

Где U_0 - напряжение в диагонали измерительного моста;

U_1 - напряжение питания;

r - активное сопротивление одной катушки преобразователя;

L - индуктивность катушки;

ω - угловая частота питающего напряжения;

$\varepsilon_r = \frac{\Delta r}{r}$ - относительное изменение активной составляющей полного сопротивления катушки преобразователя;

$\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L}$ - относительное изменение индуктивности катушки.

Пример 4.6

Перемещение конца X трубки Бурдона (λ - выходная величина) при $\gamma = 270^\circ$ выражено формулой

$$\lambda = 5,8r \frac{\Delta \gamma}{\gamma}$$

где r - радиус кривизны трубки;

$\frac{\Delta \gamma}{\gamma}$ - относительное изменение центрального угла γ в зависимости от изменения давления;

$$\frac{\Delta \gamma}{\gamma} = \Delta P \frac{1 - \mu^2}{E} * \frac{p^2}{bh} \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \frac{a}{\beta + k^2},$$

Здесь ΔP - изменение давления (входная величина);

μ - коэффициент Пуассона;

E - модуль упругости материала трубки;

a - длина большой полуоси сечения трубки;

b - то же, малой;

h - толщина стенки трубки;

α и β - коэффициенты, зависящие от отношения $\frac{a}{b}$ -

(α и β - указываются в таблицах);

k - главный параметр трубки,

Пример 4.7

Ход сильфона X определяют по формуле В. И. Королева:

$$\lambda = k_p \frac{2nPR_b^2}{Eh^3}$$

где

$$k_p = \frac{3(1-\mu^2)}{4\pi} \left(\frac{\alpha^2 - 1}{\alpha^2} - \frac{4\ln^2 \alpha}{\alpha^2 - 1} \right);$$

здесь R_n и R_b — наружный и внутренний радиусы сильфона;

n — число гофров;

P — давление (входная величина);

E — модуль упругости материала сильфона;

h — толщина-стенки.

Пример 4.8

Прогиб λ мембраны [78] (λ — выходная величина) в зависимости от давления P (входной величины) определяют из выражения в неявном виде

$$\frac{P}{E} = A \left(\frac{\lambda}{h} \right) + B \left(\frac{\lambda}{h} \right)^2 + C \left(\frac{\lambda}{h} \right)^3,$$

где E — модуль упругости материала мембраны;

h — толщина мембраны;

A , B и C — безразмерные коэффициенты, зависящие от толщины мембраны, ее большого радиуса, типа и глубины гофрировки, количества гофр и условий заделки мембраны (коэффициенты указываются в таблицах).

5. ПОКАЗАТЕЛИ ТОЧНОСТИ ИУ

В ряду показателей качества изделий: точность, надежность, долговечность, экономичность и др. — для ИУ показатели точности занимают первое место, так как качество действия ИУ выражается прежде всего точностными характеристиками. Термин точность средства измерений определяется как одна из важнейших характеристик, отражающая, близость к нулю его погрешностей.

Погрешность измерительного прибора, т. е. разность между показанием прибора и истинным значением измеряемой величины, экспериментально определяется приближенно, так как истинное значение измеряемой величины остается неизвестным и на практике его заменяют действительным значением. При изучении ИУ целесообразно сопоставлять выходные величины измерительной цепи по результатам поверки: реальное ср показание ИУ и требуемое точное (или «приписанное») φ_0 .

Реальные показания снимают непосредственно с данного ИУ по имеющейся на нем шкале. Точные показания для данного прибора определяют по показаниям средств поверки. Однако они имеют свои погрешности, хотя и значительно меньшие по абсолютной величине по сравнению с погрешностями поверяемого ИУ, поэтому данное здесь понятие «точное показание» нельзя отождествлять с понятием «идеально точное» или «истинное». Последние могут быть только воображаемыми.

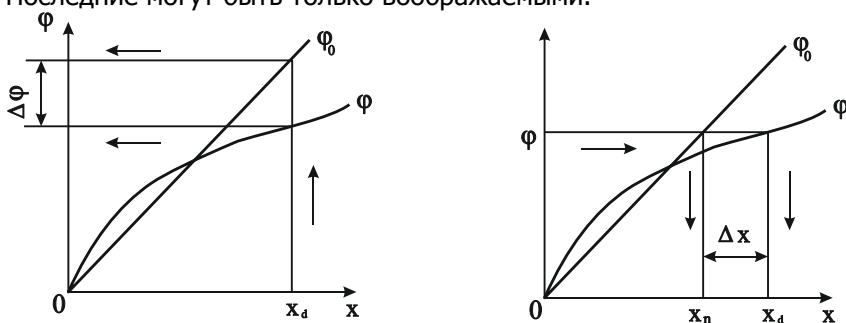


Рис. 5. Погрешность измерительного устройства по выходу $\Delta\varphi$ и по входу Δx

На рисунке 5 представлены градуировочные характеристики φ и φ_0 в двух ситуациях. Слева показаны результаты поверки ИУ с помощью аттестованной меры, имеющей действительный размер

Точность измерительных приборов

x_d . Направление хода информации показано стрелками. На выходе получаем две величины; реальное показание φ и точное показание φ_0 . Погрешность ИУ «по выходу»

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0 \quad (1)$$

Зная погрешность $\Delta\varphi$, можно при измерениях учитывать ее или вводить поправку k , равную числовому значению погрешности показаний с обратным знаком: $k = -\Delta\varphi$. Вторая ситуация показана на рисунке 5 справа — в процессе измерения неизвестной величины x . Если полагать ИУ точным, то в соответствии с требуемой точной характеристикой φ_0 находим значение x_n , которое не будет равно действительному значению x_R . Если же ввести поправку k , то получим x_d .

Погрешность ИУ «по входу» представляет разность

$$\Delta x = x_n - x_d \quad (2)$$

Погрешность Δx «по входу» возникла из-за ошибочного предположения, что ИУ не имеет погрешностей.

Пример 5.1

Реальное показание часов в момент поверки $\varphi = 12$ ч 01 мин. Точное показание (например, по радиосигналу «точное время») $\varphi_0 = 12$ ч 00 мин. Погрешность показаний часов («по выходу»)

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0 = 12 \text{ ч } 01 \text{ мин} - 12 \text{ ч } 00 \text{ мин} = +01 \text{ мин.}$$

Пример 5.2

Концевая мера длины 100 мм. Реальное показание (по маркировке) $\varphi = 100$ мм. Точное показание (по аттестату поверки) $\varphi_0 = 100,0006$ мм. Погрешность меры (т. е. погрешность ее показания)

$$\Delta\varphi = 100 - 100,0006 = 0,0006 \text{ мм.}$$

Пример 5.3

При поверке индикатора с ценой деления 0,01 мм посредством аттестованной концевой, меры длины, имеющей действительный размер 1,600 мм, получено реальное показание $\varphi = 1,597$ мм. Точное показание, которое должно быть, $\varphi_0 = 1,600$ мм. Погрешность ИУ «по выходу»

$$\Delta\varphi = 1,597 - 1,600 = -0,003 \text{ мм.}$$

$$\text{Поправка } k = -\Delta\varphi = +0,003 \text{ мм.}$$

Предположим теперь, что действительное значение меры

Точность измерительных приборов

неизвестно и что прибор точный. Получим значение меры x_n по показанию прибора (не принимая во внимание его погрешности)

$$x_n = 1,597 \text{ мм.}$$

Погрешность ИУ «по входу»

$$\Delta x = x_n - x_n = 1,597 - 1,600 = -0,003 \text{ мм.}$$

Величины φ и φ_0 могут быть выражены в любых единицах, например, в делениях шкалы, в единицах измеряемой величины, но для φ и φ_0 выбранные единицы должны быть одними и теми же. Значения величины x на входе обычно выражают в единицах измеряемой величины.

В действующих стандартах представлены общие единые правила установления пределов допускаемых погрешностей показаний по классам точности ИУ для различных областей измерительной техники. Даны определения понятий абсолютной, приведенной и относительной погрешностей показаний.

Предел допускаемой абсолютной погрешности выражается одним числом $\Delta = \pm a$, где Δ — условное обозначение обеих границ допускаемой абсолютной погрешности; a - числовое значение этого предела в единицах измеряемой величины, в делениях шкалы или в других единицах (но не в процентах).

Предел допускаемой абсолютной погрешности может быть дан в зависимости от измеряемой величины: $\Delta = \pm(a+bx)$, где a и b - постоянные параметры.

Это выражение показывает, что для одного и того же класса точности ИУ могут быть установлены различные пределы допускаемой абсолютной погрешности в зависимости от измеряемой величины x .

Предел допускаемой приведенной погрешности показаний ИУ обозначается через γ и выражается в процентах по отношению к нормирующему значению x_N

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{x_N} 100\% \quad (3)$$

где x_N равно одному из указанных ниже значений:

- 1) конечному значению рабочей части шкалы x_k (для средств измерений с равномерной и степенной шкалой, когда нулевая отметка находится в начале или вне рабочей части шкалы);
- 2) сумме конечных значений рабочей части шкалы, когда нулевая отметка находится внутри шкалы;
- 3) номинальному значению x (если оно установлено);
- 4) длине шкалы — при логарифмической и гиперболической шкале.

Точность измерительных приборов

Класс точности обозначают числом, совпадающим с пределом допускаемой приведенной погрешности.

Пример 5.4

Амперметр с диапазоном измерений от 0 до 50 А имеет предел допускаемой абсолютной погрешности $\pm 0,5$ А. В этом случае предел допускаемой приведенной погрешности

$$\gamma = \frac{0,5}{50} 100\% = 1\%, \text{ класс точности } 1.$$

Предел допускаемой относительной погрешности обозначается через δ и выражается в процентах по отношению к измеряемой величине x

$\delta = \pm \frac{\Delta \cdot 100}{x} \% = \pm c\%$, т.е. в одном и том же классе точность δ уменьшается при увеличении x . Если Δ зависит от x по уравнению, то

$$\delta = \pm \frac{1}{x}(a+bx) \% = \pm \left(b + \frac{a}{x}\right) \% .$$

(Полагаем, что число 100 входит в a и b).

Для того чтобы связать δ с конечным значением шкалы, к последнему выражению прибавим $\frac{a}{x_k}$, затем вычтем эту же величину

$$\delta = \pm \left(b + \frac{a}{x_k} - \frac{a}{x_k} + \frac{a}{x}\right) \% .$$

Введем обозначения:

$$c = b + \frac{a}{x_k}; \quad d = \frac{a}{x_k}, \text{ откуда } \alpha = dx_k.$$

Тогда

$$\delta = \pm \left(c - d + \frac{dx_k}{x} + 1\right) \%$$

Окончательно

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{x_k}{x} - 1\right)\right] \%$$

Отсюда следует, что минимальное значение δ будет при $x = x_k$. Однако практика показала, что δ_{\min} будет не только при $x = x_k$, а иногда и при других значениях x . В этих случаях вместо x вводят x_0 — значение измеряемой величины, при котором предел допускаемой погрешности δ имеет минимальное значение. Значение b возрастает как при убывании, так и при возрастании x от

Точность измерительных приборов

носителем x_0 , поэтому вводят модуль разности $|\frac{x_0}{x} - 1|$. Получаем

$$\delta = \pm [c + d |\frac{x_0}{x} - 1|] \%$$

Существует два вида классов точности ИУ: один - для пределов допускаемой абсолютной погрешности, второй - для пределов допускаемой приведенной и относительной погрешностей.

Установлены следующие ряды чисел для обозначения классов точности: 1; 1,5; 2; 2,5; (3); 5; 6. Стоящее в скобках число (3) не рекомендуется, но допускается.

Способы обозначения точности в документах и на измерительных приборах показаны на примерах в таблице 1.

Таблица 1

Обозначение		
Пример	В документах	На приборах
$\delta = \pm 0,5\%$	0,5	0,5
$\delta = \pm [0,002 + 0,01(\frac{x_0}{x} - 1)]$	0,02/0,01	0,02/0,01
$\delta = \pm [0,5 + 0,2(\frac{x_0}{x} - 1)]$ $\gamma = \pm 1,5\% \quad x_N = x_k$	0,5/ 0,2 1,5	0,5/ 0,2 1,5
$\gamma = \pm 0,5\% \quad x_N - \text{длине шкалы}$	0,5	1,5 0,5

Предусмотрены нормальные и расширенные значения (или области значений) величин, влияющих на точность (температура, вибрации и пр.) Примеры см. в табл. 2, Область нормальных значений подчеркивается.

Таблица 2

Нормальное значение, Гц	Расширенное значение, Гц	Обозначение
400	-	400 Гц
45-550	-	45-550 Гц
50	20-120	20—50-120 Гц
40-60	40-120	40-60—120 Гц
40-60	10-120	10-40-60— 120 Гц

Влияющая физическая величина — это такая физическая величина, которая не является измеряемой данным средством измерений, но влияет на результаты измерений этим средством.

Точность измерительных приборов

Нормальным значением (нормальной областью значений) влияющей величины называется такое ее значение (область значений), которое устанавливается в стандартах или технических условиях на средства измерений данного вида в качестве нормального для этих средств измерений.

Формулы, приведенные выше, даны для построения системы допусков на погрешности средств измерений. В дальнейшем буквы Δ , δ и γ будут применяться в качестве символов для обозначения той или иной погрешности (абсолютной, относительной или приведенной) совместно с обозначением измеряемой величины, например $\Delta\phi$, $\delta\phi$, $\gamma\phi$ (для погрешности на выходе измерительной цепи) или Δq , δq , γq (для первичных погрешностей).

Кроме того, нормированные пределы допускаемых погрешностей будут заключены в квадратные скобки: $[\Delta\phi]$, $[\Delta q]$. Если речь пойдет о ненормированных погрешностях, последние будут обозначены без этих скобок. В настоящем параграфе рассматриваем только детерминированные (определенные, неслучайные) погрешности.

Характеристики показаний были представлены как функции измеряемой величины (см. рис. 5). Погрешность «по выходу» $\Delta\phi$ также является функцией x . Вместе с тем $\Delta\phi$ может быть представлена как функция ϕ (рис. 6). Такое представление удобно для исследования: непосредственно выявляются наибольшее ($\Delta\phi_{\max}$) и наименьшее ($\Delta\phi_{\min}$) значения, ширина зоны погрешностей ζ ($\Delta\phi$), равная абсолютному значению разности между $\Delta\phi_{\max}$ и $\Delta\phi_{\min}$: $\phi(\Delta\phi) = |\Delta\phi_{\max} - \Delta\phi_{\min}|$.

Если $\Delta\phi$ определяют как разность показаний при прямом и обратном ходе, то ширину зоны определяют с учетом всего ряда погрешностей в диапазоне измерений. Ширина зоны погрешностей при прямом и обратном подходах к данному значению измеряемой величины в метрологической практике называется вариацией. Наибольшее значение вариации (т. е. погрешности обратного хода) является одной из характеристик точности средства измерений.

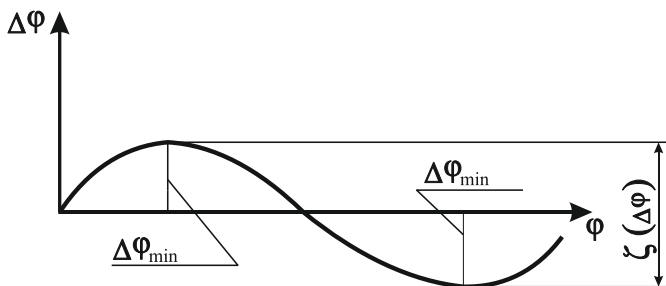


Рис. 6. Погрешность измерительного устройства «по выходу» как функция $\Delta\varphi(\varphi)$

В настоящее время на различных предприятиях практикуются различные способы установления метрологических характеристик измерительных устройств, что может привести к расхождению при оценке качества одного и того же прибора поставщиком и потребителем. В связи с этим признано необходимым установить единообразную систему нормирования метрологических характеристик средств измерения.

Определение понятия погрешности показаний ИУ согласуется с показателями точности действия механизма [9]: погрешностью положения и перемещения выходного звена механизма. Погрешность положения выходного звена определяется как разность между действительным и идеально точным положениями. Погрешность перемещения есть разность погрешностей, найденных в двух заданных: положениях. Если первое положение задать в точке, где ИУ настраивается на нуль, то погрешность перемещения будет соответствовать погрешности показаний ИУ. Если два положения выходного звена механизма задать в точках, соответствующих $\Delta\varphi_{\max}$ и $\Delta\varphi_{\min}$, то абсолютное значение погрешности перемещения будет соответствовать ширине зоны погрешностей показаний. Заменяем координату φ функции $\Delta\varphi(\varphi)$ по рис. 6 аргументом t (время). Тогда первая производная от $\Delta\varphi$ по t , т. е.

$\frac{d}{dt} [\Delta\varphi(t)] = \dot{\Delta\varphi}(t)$, будет представлять скорость изменения погрешности показаний. Вторая производная

$\frac{d^2}{dt^2} [\Delta\varphi(t)] = \ddot{\Delta\varphi}(t)$, есть ускорение для $\Delta\varphi(t)$, связанное с динамическими явлениями.

6. СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ВИДОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИУ

Погрешности ИУ необходимо рассматривать с различных точек зрения в зависимости от их принадлежности, способа учета аргумента и от того, учитываются ли случайные погрешности. Вопрос о принадлежности решается указанием, к чему относится изучаемая погрешность: к показанию ИУ в целом или к отдельным его параметрам. Для учета аргумента измеряемую величину рассматривают как постоянную или как представляющую функцию некоторого неслучайного параметра. Указанные обстоятельства, а также учет случайных погрешностей отражены на рис. 7, где показана связь между формами выражения погрешности. Из рис. 7 следует, что погрешность показаний ИУ при внешних нормальных условиях возникает, во-первых, из-за расхождения между характеристикой, обусловленной схемой ИУ, и требуемой точной характеристикой и, во-вторых, из-за расхождения между действительными и требуемыми точными значениями параметров. Первая причина является погрешностью, обусловленной схемой ИУ, — $\Delta f_{сх}$, вторая причина представляет собой действие первичных погрешностей Δq_s (q_s — параметр номер s).

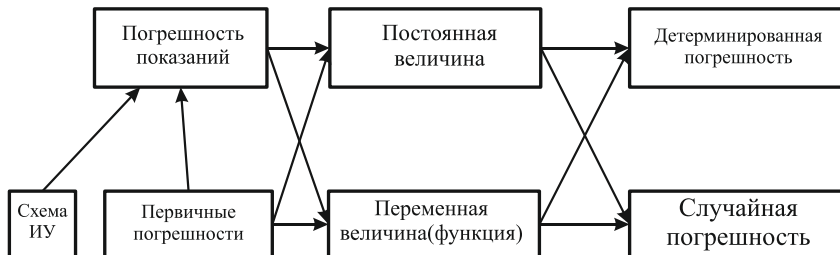


Рис. 7. Формы выражения погрешности ИУ

Погрешность показаний ИУ может быть представлена "или постоянной, или переменной величиной (функцией некоторого неслучайного аргумента: времени, номера контрольной точки и пр.).

В свою очередь, погрешность, являющаяся постоянной величиной, может быть рассмотрена или как детерминированная (определенная, неслучайная), или как случайная, с учетом вероятностей появления отдельных значений. Так же и погрешность-функция может быть или детерминированной, или случайной.

Точность измерительных приборов

То же самое можно сказать и о первичных погрешностях. Внешние факторы, влияющие на параметры ИУ, и факторы связанные с измеряемой величиной и влияющие на показания ИУ, полагаем отсутствующими. Такое предположение оправдано стремлением исследовать свойства ИУ при нормальных условиях. Погрешность показаний может быть рассмотрена как результат действия внутренних факторов (схемы ИУ, первичных погрешностей), но может быть исследована и независимо от них.

При расчетах ИУ на точность важно иметь ясное представление о том, в какой форме выражена погрешность, так как с этим связано математическое обоснование метода расчета. В частности, если погрешность рассматривают в детерминированных условиях, то применяют математический аппарат конечных или обыкновенных дифференциальных уравнений. При переходе к вероятностным условиям следует выяснить, как выражена погрешность: постоянной (по времени) величиной или функцией? В первом случае используют математический аппарат теории вероятностей, во втором - теорию случайных функций. После выполнения расчетов ИУ на точность следует выяснить, находится ли полученное расчетом значение погрешности показаний ИУ в пределах допускаемых погрешностей и с какой вероятностью (каков процент риска).

По результатам расчета выясняют правильность выбора схемы ИУ и установления допусков на первичные погрешности.

7. ПРИНЦИПЫ УСТАНОВЛЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИУ

Измерительная цепь средства измерений представляет собой совокупность преобразовательных элементов средства измерений, обеспечивающую осуществление всех преобразований сигнала измерительной информации. В одном преобразовательном элементе средства измерений происходит одно из ряда последовательных преобразований величины. Каждый преобразовательный элемент и каждый элемент конструкции вносят свои погрешности, которые оказывают общее совместное влияние на выходной сигнал (на показание ИУ).

Большое число разнообразных влияющих величин требует формулирования некоторых принципов при решении вопросов о том, как устанавливать перечень первичных погрешностей, какие погрешности являются первичными, какие вторичными? Условимся считать первичной погрешностью ту, которая имеется в данном элементе ИУ, вторичной погрешностью — ту, которая появляется на выходе ИУ или его элемента в результате действия первичной погрешности. Последовательное деление ИУ на элементы может быть выполнено более или менее укрупненно. Предлагается следующая система последовательного деления ИУ на элементы по ступеням (при исследовании ИУ это деление можно ограничить любой ступенью):

- 1-я: узлы и блоки;
- 2-я: кинематическая пара;
- 3-я: детали ИУ;
- 4-я: рабочие поверхности деталей.

Первичной погрешностью называется разность между действительным и требуемым точным значениями параметра, характеризующего данный элемент ИУ. Если рассматривается ИУ в целом, то первичными погрешностями являются погрешности на всех ступенях деления. Если рассматривать блок или узел, то на 1-й ступени деления будем иметь выходную величину, на 2—4-й ступенях — первичные погрешности. Причины возникновения их различны: условия изготовления и эксплуатации, внешние воздействия сил, вибрации, износ и пр. В нашей постановке задачи полагаем первичные погрешности заданными (не входя в рассмотрение причин их возникновения).

Узлы и блоки различаются по выполняемым, ими функциям

Точность измерительных приборов

в процессе измерения. В частности, для механических ИУ предложено следующее деление: устройства для базирования, координирования, настройки, образцовых перемещений, измерительных перемещений, отсчета или записи, контактирования чувствительного элемента с измеряемым объектом.

К устройствам для базирования относятся: центры, призмы, оправки, патроны и т. п. Устройства для координирования определяют положение измеряемой поверхности относительно измерительного наконечника. Устройства для настройки обеспечивают установку ИУ на начало измерений. Устройства для образцовых перемещений используются для заданного линейного или углового перемещения чувствительного элемента относительно измеряемой поверхности объекта измерений. Устройство для измерительных перемещений обеспечивает движение чувствительного элемента в зависимости от погрешности измеряемого объекта.

На второй ступени деления кинематические пары различают по числу связей. Известно, что это число определяет класс кинематической пары:

- класс 1 — одна связь; пример: шар на плоскости;
- класс 2 — две связи; пример: цилиндр на плоскости;
- класс 3 — три связи; пример: плоское звено на плоскости;
- класс 4 — четыре связи; пример: втулка на валу, не имеющая ограничения вдоль оси и при повороте;
- класс 5 — пять связей; пример: шарнир.

По конструктивному признаку кинематические пары подразделяются на низшие и высшие. У низших пар элементы касаются по поверхности, у высших — по линиям и точкам.

На третьей ступени деления ИУ для каждой детали должен быть указан параметр, по которому можно определить точность детали в целом и точность ее положения в ИУ.

На четвертой ступени деления указаны рабочие поверхности детали, которые можно различать по геометрическому признаку: сферическая, цилиндрическая, винтовая, в виде плоскости и др.

Можно представить систему, в которой параметр рабочей поверхности будет выходной величиной, например систему СПИД (станок — приспособление — инструмент — деталь). Но тогда возникнет другая постановка задачи, когда рассматривается влияние параметров технологического процесса. В рамках изучения ИУ ограничиваем деление четвертой ступенью (рабочие поверхности детали).

Точность измерительных приборов

По аналогии с указанным делением механических ИУ можно подразделить на ступени ИУ, использующие любые физические явления, и ограничиться определенной ступенью деления при установлении первичных погрешностей. Например, при изучении электрических ИУ последней ступенью деления принимают такие элементы, для которых учитывают погрешности сил тока, омических сопротивлений, емкостей, индуктивностей и других электрических величин.

Рассмотрим условия, которым должны удовлетворять первичные погрешности ИУ с тем, чтобы обеспечивалась возможность расчета погрешности показаний ИУ в зависимости от каждой первичной погрешности в отдельности и от их совместного действия.

Первое условие — соблюдение принципа координирования. Отсчет всех первичных погрешностей ИУ необходимо выполнять в единой системе координат. Для отсчета погрешностей элементов (на различных ступенях деления) могут быть применены вспомогательные системы координат, увязанные с основной системой. Этим обеспечивается полный охват погрешностей и возможность описания в математической форме влияния первичных погрешностей на выходной сигнал.

Второе условие - соблюдение принципа независимости действия первичных погрешностей. Первичные погрешности следует задавать так, чтобы одна погрешность не входила в другую и чтобы влияние одной первичной погрешности можно было определить, полагая все прочие первичные погрешности равными нулю. Отступление от этого принципа (иногда вынужденное) приводит к необходимости учета взаимной связи первичных погрешностей и к большому усложнению всего расчета на точность.

Третье условие — соблюдение принципа однозначности. Каждый параметр, погрешность которого определяют, должен быть представлен такими существенными, постоянными признаками, чтобы его теоретическое значение было единственным. Для этого применяют выбранные и зафиксированные определенным образом условные «представители» предмета: точки, оси, сечения и др. Отступление от принципа однозначности приводит к неопределенности представления об измеряемой величине, вследствие чего теряется смысл установления ее погрешности.

Пример 7.1

При аттестации образцовой меры чистоты поверхности отмечают двумя точками то сечение штриха на плоскости, в котором аттестуют глубину штриха (рис. 8). Условным «представителем» параметра является отмеченное сечение штриха, чем обеспечивается однозначность определения глубины штриха как при аттестации образцовой меры, так и при проверке двойного микроскопа.

При построении системы первичных погрешностей, относящихся к деталям приборов и их рабочим поверхностям, соблюдение принципа однозначности обеспечивается выбором «представителя» детали и установлением вспомогательных систем координат. Представителем каждой детали может служить одна точка C , выбранная определенным образом. Координаты этой точки C (x_c, y_c, z_c) однозначно определяют ее положение в единой системе координат ИУ (система координат может быть любой, для данного рассмотрения принимаем условно прямоугольную систему).

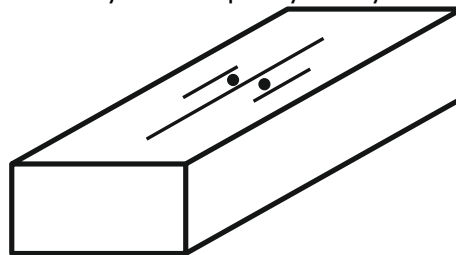


Рис. 8. Образцовая мера чистоты поверхности

Взяв точку C за начало вспомогательной системы координат, направляем ее оси x', y', z' так, как принято в чертеже детали. Но действительные координаты точки C могут не совпадать с требуемыми точными их значениями $x/, y/, z/$. Так же и действительные направления осей Cx', Cy', Cz' могут не совпадать с требуемыми по чертежу точными направлениями Cx'_0, Cy'_0, Cz'_0 . Изменение координат точки C и углы поворота осей вспомогательной системы координат однозначно определяют первичные погрешности, относящиеся к детали в целом. Погрешности, отсчитанные во вспомогательной системе координат с действительным началом, однозначно определяют первичные погрешности, относящиеся к рабочей поверхности детали. Первичные погрешности, заданные постоянными (по времени) величинами без

Точность измерительных приборов

учета их направления, называются скалярными первичными погрешностями. Если первичные погрешности заданы длиной (модулем) вектора и его направлением, то они называются векторными первичными погрешностями.

Приведем несколько примеров установления системы первичных погрешностей.

Пример 7.2

Первичные погрешности детали, выполненной в виде сферы (рис. 9).

Центр сферы C является ее представителем, следовательно, действительное положение детали определяется координатами точки C . Точка C_0 определяет требуемое точное положение детали в системе координат O_{xyz} , связанной с ИУ. Первичные погрешности сферы

$$\Delta x_c = x_c - x_{c_0},$$

$$\Delta y_c = y_c - y_{c_0},$$

$$\Delta z_c = z_c - z_{c_0}.$$

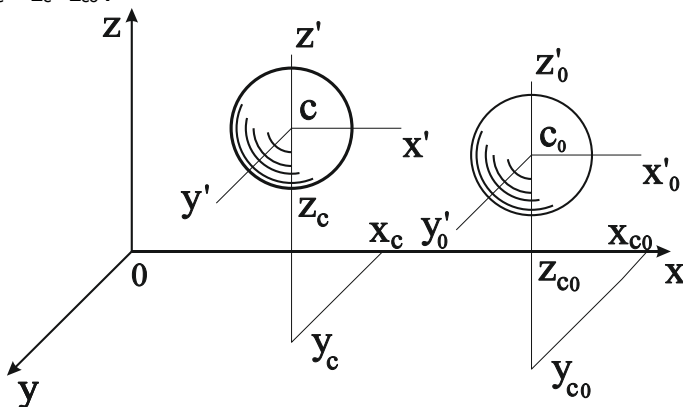


Рис. 9. Координаты положения детали, выполненной в виде сферы

Изменение направления осей координат здесь не имеет значения.

Необходимо учитывать также погрешность радиуса сферы $\Delta r = r - r_0$, где r - действительный радиус сферы (полагая его постоянным во всех направлениях);

r_0 — требуемый точный радиус сферы.

Погрешность формы может быть представлена как погреш-

Точность измерительных приборов

ность радиуса при переменном g , зависящем от координат вспомогательной системы $Sx'y'z'$.

Всего учитывают для сферы четыре скалярных первичных погрешности: Δx_c , Δy_c , Δr_c и Δr .

Пример 7.3

Первичные погрешности детали, выполненной в виде цилиндра (рис. 10). Представителем детали является точка C , ее положение задано в системе O_{xyz} , относящейся к ИУ, координатами x_{c0} , y_{c0} , z_{c0} центра заданного нормального к оси сечения цилиндра (в частности, сечение может быть задано на середине длины цилиндра). Вспомогательная система координат $Sx'y'z'$ может не совпадать с требуемым точным положением системы $S_0x_0'y_0'z_0'$. Для цилиндра смещение точки C вдоль оси Sy' не имеет значения, поэтому его не учитывают (полагая $Y_c - Y_{c0}$).

Смещение по двум другим осям приводит к первичным погрешностям Δx_c и Δz_c . Оно соответствует поступательному, параллельному себе, смещению оси Sy' и выражается в форме эксцентриситета оси

Смещение по двум другим осям приводит к первичным погрешностям Δx_c и Δz_c . Оно соответствует поступательному, параллельному себе, смещению оси Sy' и выражается в форме эксцентриситета оси

$$\Delta e = \sqrt{\Delta x_c^2 + \Delta z_c^2};$$

Эксцентриситет является векторной погрешностью с модулем (длиной вектора), равным расстоянию $S_0C = \Delta e$.

Направление вектора определяется углом ψ_e между вектором Δe и осью S_0x_0' , Поворот действительных осей вспомогательной системы координат выражается в виде перекоса оси цилиндра, обозначаемого через $\Delta \gamma_1$ (на рисунке не показан). Он определяется как поворот оси цилиндра на угол $\Delta \gamma_1$ вокруг прямой AA , расположенной в заданном нормальном сечении детали под некоторым углом γ к оси S_0x_0' . Часто этот полный поворот определяют как результат двух поворотов: один — вокруг оси S_0x_0' , второй — вокруг оси S_0z_0' (так обычно задают в чертежах допуски на перекося оси цилиндра).

Точность измерительных приборов

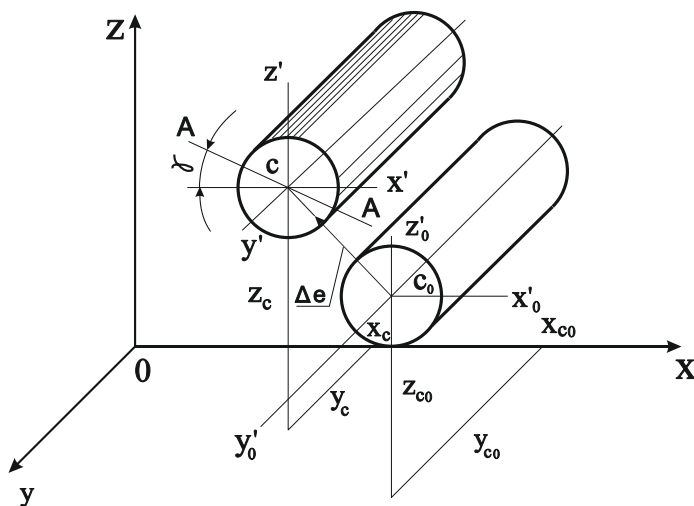


Рис. 10. Координаты положения детали, выполненной о виде цилиндра

Кроме этого, учитывают погрешность радиуса Δr цилиндра либо как постоянную величину (если пренебрегают погрешностью формы поверхности), либо как функцию координат $\Delta r(x', y', z')$ вспомогательной системы (если принимают во внимание погрешности формы поверхности).

Всего учитывают для цилиндра две векторные погрешности Δe . Δu и одну скалярную Δr .

Пример 7.4

Первичные погрешности плоской поверхности (рис. 11).

Представителем плоской поверхности детали является точка C с координатами x_{c0}, y_{c0}, z_{c0} . Например, положение точки C может быть задано на пересечении диагоналей прямоугольника, ограничивающего поверхность.

Действительное положение плоской поверхности можно представить как результат поступательного смещения точки C (вместе с плоскостью) в направлении оси Oz на величину Δr_c и поворота плоскости на угол Δu вокруг прямой AA' , лежащей в заданной плоскости.

Точность измерительных приборов

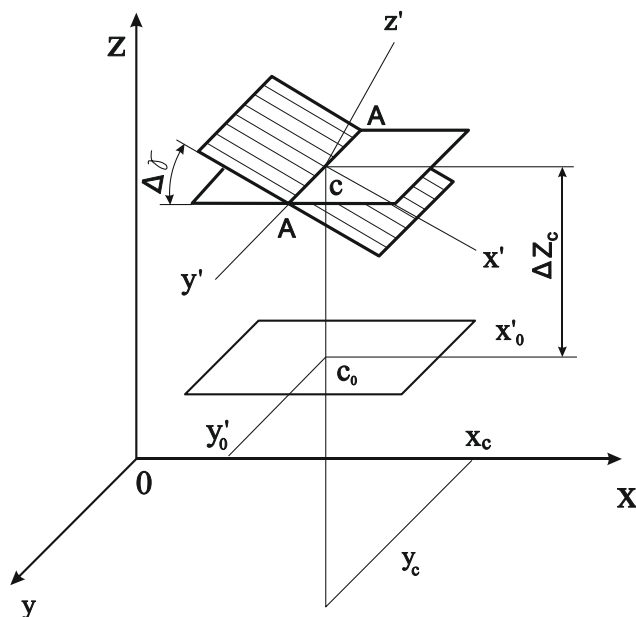


Рис. 11. Координаты положения плоской поверхности

Всего для плоской поверхности учитывают три первичных погрешности: Δz_c (скалярную), $\Delta \gamma$ (векторную) и $\Delta z(x', y', z')$ — погрешность как функцию координат вспомогательной системы. Погрешность Δz является скалярной, она характеризует погрешности формы плоской поверхности.

Пример 7.5. Первичные погрешности шпоночного паза на валу (рис. 12).

Точность измерительных приборов

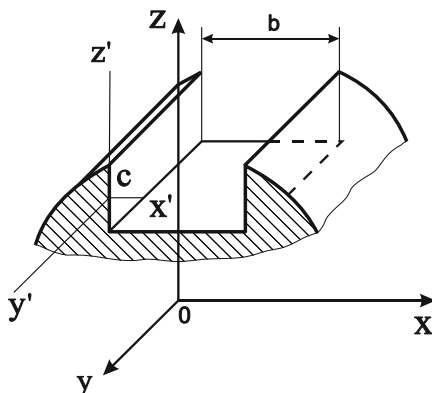


Рис. 12. Координаты боковой поверхности шпоночного паза на валу

Основную систему координат $Oxyz$ располагаем так, чтобы ось вала совпадала с осью Oy , ось Oz проходила в середине ширины паза в заданном сечении вала, где находится и ось Ox . Рассмотрим одну левую вертикальную плоскость паза. Ее представителем является точка C , взятая на половине глубины паза, на линии пересечения стенки паза с заданным сечением вала.

Координаты точки C : $x_c = -\frac{b}{2}$ (где b — ширина паза); $y_c = 0$

и z_c . Первичные погрешности стенки паза: $\Delta x_c = -\frac{b}{2}$; Δy — угол поворота оси Oz при перекосе. Обычно полный перекос задают двумя составляющими величинами: Δy — поворотом плоскости вокруг оси Oy' и Δy_z , — поворотом плоскости вокруг оси $\frac{\Delta b}{2}$.

Из примера 7.5 видно, что задание допуска на полную ширину шпоночного паза не обеспечит симметричности положения паза на валу относительно оси Oz . Поэтому необходимо задавать допуск на половину ширины паза, т. е. на $\frac{\Delta b}{2}$.

При нескольких пазах, что имеет место у шлицевого вала, учитывают, кроме того, еще и погрешность углового положения Δt оси симметрии каждого паза.

8. ПОГРЕШНОСТИ ПОКАЗАНИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ СХемой ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ИУ

Функция $\varphi_{сх}$ для пневматических ИУ зависит от многих параметров. Практика применения пневматических ИУ показала, что существенное значение имеет сжимаемость воздуха и этот фактор необходимо учитывать. Кроме того, необходимо принимать во внимание коэффициент истечения воздуха через входное и измерительное (выходное) сопла. Способы учета этих факторов показаны на примерах.

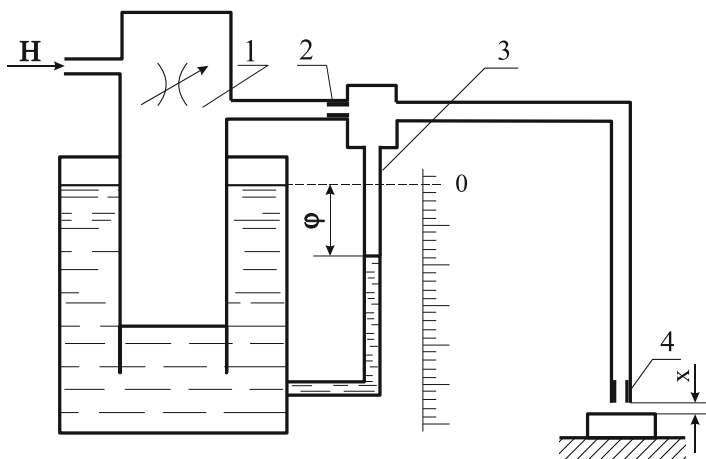


Рис. 13. Схема измерительной цепи пневматического измерительного прибора с водяным манометром: 1 - дроссель; 2 - входное сопло; 3 - манометрическая трубка; 4 - выходное сопло

Пример 8.1

На рисунке 13 представлена схема измерительной цепи пневматического длиномера с водяным манометром [35, стр. 235], где входной величиной является зазор x между срезом выходного сопла и поверхностью измеряемой детали. Выходную величину h — показание прибора по водяному манометру отсчитывают с помощью равномерной шкалы сверху вниз. (В пневматических приборах выходную величину принято обозначать через h).

Точность измерительных приборов

Показание прибора, обусловленное принципиальной схемой, в/ предположении равенства коэффициентов истечения через входное и "измерительное сопла и с учетом сжимаемости воздуха, может быть вычислено по формуле, предложенной Б. Н. Марковым и Е. И, Педем (Станкин).

$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{\zeta} - \sigma \zeta + \sigma} - 1 \quad (4)$$

где

$$\varphi = \frac{4d_2x}{d_1^2}; \quad \zeta = \frac{h}{H}; \quad \sigma = \frac{H}{P_a};$$

d_1 — диаметр входного сопла;

d_2 — диаметр выходного (измерительного) сопла;

x — зазор (измеряемая величина);

h — измерительное давление (показание прибора);

H — рабочее давление воздуха;

P_a — атмосферное давление.

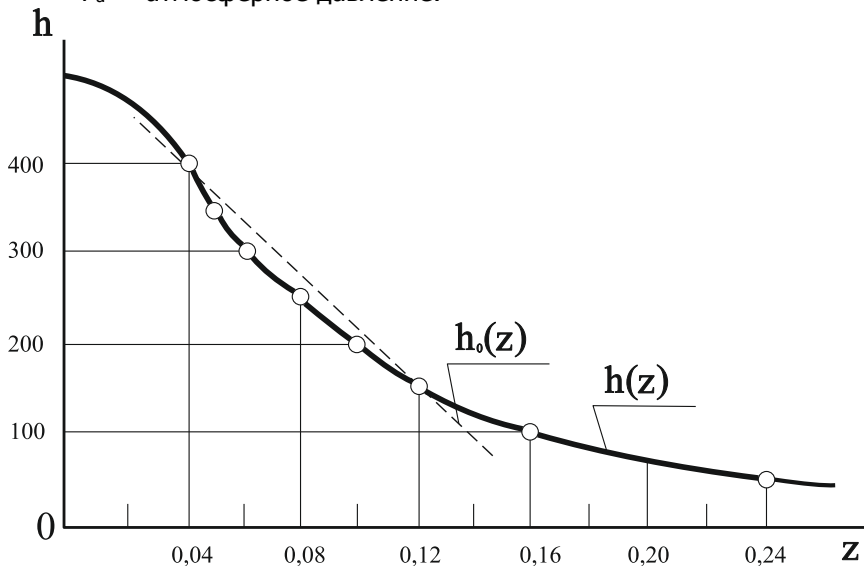


Рис. 14. Расчетная $h(z)$ и требуемая $h_0(z)$ характеристики пневматического измерительного прибора с водяным манометром

Показание прибора h в зависимости от зазора x характеризуется графиком (рис. 14), построенным при заданных условиях.

Точность измерительных приборов

Пусть, например, $d_1 = 0,8$ мм, $d_2 = 2$ мм, $H = 500$ мм вод. ст.

Атмосферное давление $P_a = 9,80665 \cdot 10^4$ Па, но так как 1 мм вод. ст. = 9,80665 Па, то, выражая P_a в миллиметрах водяного столба, находим $P_a = 10000$ мм вод. ст.

При этих условиях

$$\varphi = \frac{4 \cdot 2 \cdot z}{0,8^2} = \frac{z}{0,08}; \quad \zeta = \frac{h}{500}; \quad \sigma = \frac{500}{10000} = 0,05.$$

Задаваясь значениями h , находим z . Например, при $h = 200$ мм

$$z = 0,08 \sqrt{\frac{1}{0,4} - 0,05 \cdot 0,4 + 0,5 - 1} = 0,1 \text{ мм.}$$

Ввиду значительного расхождения функции (ШЛО) и требуемой точной характеристики h_0 при равномерной шкале обычно устанавливают ограниченный диапазон измерений, где погрешность $\Delta h_{сх} = h - h_0$ не выходит за пределы допустимых значений. В выбранном диапазоне определяют:

- 1) цену деления равномерной шкалы,
- 2) значения наибольшей и наименьшей погрешности «теоретических» показаний (т. е. погрешности, обусловленной схемой),
- 3) ширину зоны погрешностей.

Пример 8.2

Градуировочная характеристика пневматической измерительной системы, содержащей несколько измерительных сопел [2, стр. 134], выражена формулой

$$h = \frac{H}{1 + B^* x^2} \quad (5)$$

где

$$B^* = 16 \left(\frac{m}{a} \right)^2 k^* k_{\mu}^* \frac{d_{ит}^2}{d_{с}^4} \quad (6)$$

h — измерительное давление;

H — входное давление воздуха;

x — измерительный зазор;

t — число измерительных сопел;

a — коэффициент, учитывающий особенности расположения измерительных сопел относительно измеряемой детали;

Точность измерительных приборов

k^* — множитель, учитывающий сжимаемость потока воздуха;

k_{μ}^* — множитель, учитывающий коэффициент расхода воздуха через входное и измерительные сопла;

$d_{ит}$ — диаметры измерительных сопел;

$d_{в}$ — диаметр входного сопла.

Коэффициент k^* определяют по формуле

$$k^* = \frac{1}{1 + \frac{3}{4}H} \quad (7)$$

Характеристика системы, построенная по формулам (5) и (6), представлена на рисунке 15. Для показанной кривой характерна точка перегиба А (x^* , h^*). Координаты точки А определяют по формулам

$$x^* = \frac{1}{\sqrt{3B^*}} \quad (8)$$

$$k^* = \frac{3}{4}H \quad (9)$$

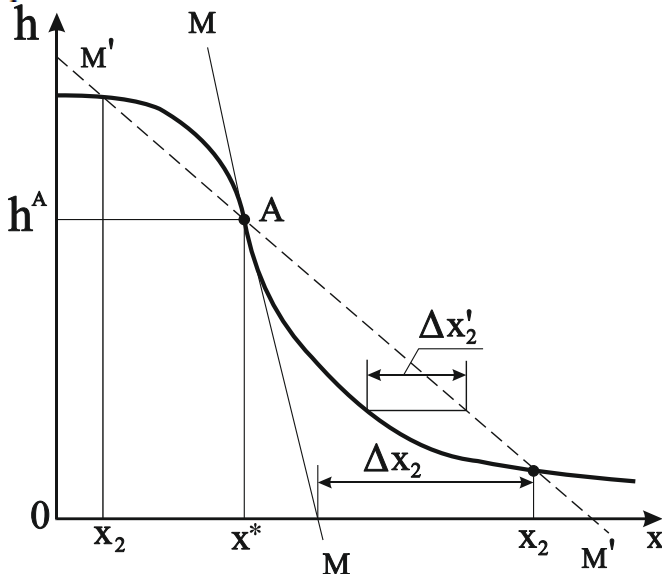


Рис. 15. Характеристика $k(s)$ пневматической системы, содержащей несколько измерительных сопел

Для расчета погрешности показаний $\Delta h_{сх}$, обусловленной схемой ИУ, принимают определенный способ линеаризации характеристики: прямую MM' проводят через точку перегиба А, но

Точность измерительных приборов

под другим углом, пересекая кривую $h(x)$ в точках, соответствующих наладочным зазорам x_1 и x_2 . Наибольшее значение погрешности Δh_{cx} , отсчитываемое от прямой MM , равно Δx_2 , а от прямой $M'M'$ - соответственно $\Delta x'_2$.

Отношение

$$W_2 = \frac{\Delta x_2}{\Delta x'_2} \geq 2.$$

Числовой пример:

$$H=2,0 \text{ кг/см}^2, m = 4, a = 2.$$

$$k^* = \frac{1}{1 + \frac{a}{4} * 2} = 0,4; k_{\mu}^* = 1; d_{ит} = 1,0 \text{ мм}$$

$$d_b = 1,2 \text{ мм.}$$

$$B^* = 16 \left(\frac{4}{2}\right)^2 * 0,4 * 1 \frac{1,0^2}{1,2^4}$$

Зазор соответствующий точке перегиба A , находят по формуле (8)

$$x^* = \frac{1}{\sqrt{3 * 12,3}} = 0,165 \text{ мм}$$

соответствующее показание прибора — по формуле (5)

$$h^* = \frac{2}{1 + 12,3 * 0,165^2} = 1,5 \text{ кг/см}^2$$

что согласуется с расчетом

$$h^* = \frac{3}{4} H = \frac{3 * 2}{4} = 1,5 \text{ кг/см}^2$$

После построения теоретической характеристики $h(x)$ и требуемой точной («приписанной») характеристики $h_0(x)$ при заданных наладочных зазорах X и X_f можно найти погрешность Δh_{cx} «по входу» и соответствующую ей погрешность Δh_{cx} «по выходу» при любом зазоре x .

Интерес представляют значение зазора x , при котором погрешность Δh_{cx} достигает наибольшего абсолютного значения, и ширина зоны погрешностей.

9. ПОГРЕШНОСТИ ПОКАЗАНИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ СХемой ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИУ

Приложение понятия о погрешности, обусловленной схемой ИУ, к электрическим устройствам, рассмотрим на следующих примерах.

Пример 9.1

Схема линейного нагруженного потенциометра (рис. 16) предназначена для деления входного напряжения.

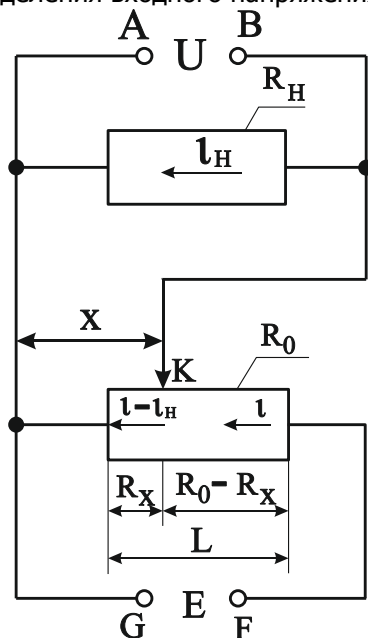


Рис. 16. Схема линейного нагруженного потенциометра

По идее выходное напряжение U_0 (точное) должно изменяться пропорционально длине x устанавливаемого сопротивления R_x . Но действие сопротивления нагрузки R_H нарушает эту пропорциональность. Поэтому действительное выходное напряжение U отличается от U_0 , в результате чего возникает погрешность, обусловленная схемой,

$$\Delta U_{cx} = U - U_0 \quad (10)$$

Для выяснения значения этой погрешности рассмотрим заданную схему. В точке контакта K ток i разветвляется: часть

Точность измерительных приборов

тока i_h пойдет по сопротивлению R_h , другая часть $i - i_h$ потечет по сопротивлению R_x . На основании второго закона Кирхгофа

$$E = i(R_0 - R_x) + (i - i_h)R_x,$$

где R_0 — постоянное сопротивление.

Выходное напряжение U соответствует, с одной стороны, падению напряжения на сопротивлении R_h , с другой — на сопротивлении R_x ,

$$U = i_h R_h = (i - i_h)R_x,$$

отсюда

$$i i - i_h = \frac{U}{R_x}; \quad i_h = \frac{U}{R_h};$$

$$i = i_h + \frac{U}{R_x} = \frac{U}{R_h} + \frac{U}{R_x} = U \frac{R_x + R_h}{R_x R_h}$$

Подставим полученное выражение в формулу,

$$E = U \frac{(R_x + R_h)(R_0 - R_x)}{R_x R_h} + U, \quad (11)$$

отсюда

$$U = E \frac{R_x R_h}{R_0 (R_x + R_h) R_x^2} \quad (12)$$

Разделив числитель и знаменатель на $R_0 R_h$, выразим U в иной форме:

$$U = E \frac{\frac{R_x}{R_0}}{\left(\frac{R_x}{R_h} + 1\right) - \frac{R_x^2}{R_0 R_h}}$$

Если нагрузка снята, то

$$\lim_{R_h \rightarrow \infty} U = E \frac{R_x}{R_0} = U_0 \quad (13)$$

Введем обозначения отношений:

$$\frac{R_x}{R_0} = \gamma;$$

$$\frac{R_0}{R_h} = \alpha$$

Получим

$$\frac{R_x}{R_h} = \frac{R_x R_0}{R_0 R_h} = \alpha \gamma; \quad \frac{R_x^2}{R_0 R_h} = \alpha \gamma^2$$

$$U = E \frac{\gamma}{1 + \alpha \gamma (1 - \gamma)} \quad (14)$$

$$U_0 = E \gamma \quad (15)$$

Точность измерительных приборов

Погрешность, обусловленная схемой,

$$\Delta U_{\text{сх}} = U - U_0 = -E \frac{\alpha \gamma^2 (1 - \gamma)}{1 + \alpha \gamma (1 - \gamma)}. \quad (16)$$

Если принять $\gamma \rightarrow 1$, то $\alpha \gamma (1 - \gamma) < 1$ и можно принять для $\Delta U_{\text{сх}}$ приближенное выражение

$$\Delta U_{\text{сх}} \approx -E \alpha \gamma^2 (1 - \gamma). \quad (17)$$

Точность нагруженного потенциометра можно повысить уменьшением γ (т.е. уменьшением рабочего диапазона), а также введением добавочного сопротивления.

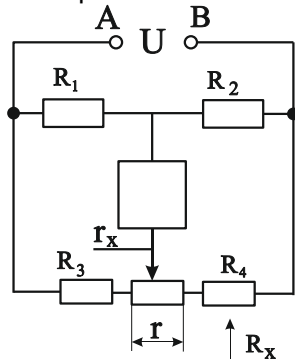


Рис. 17. Мостовая измерительная электросхема

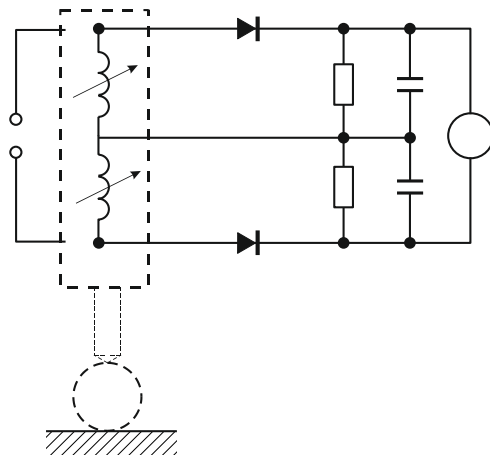


Рис. 18. Первичный индуктивный преобразователь, построенный по мостовой электросхеме

Пример 9.2

Рассмотрим мостовую измерительную электросхему (рис. 18), на которой приняты следующие обозначения:

R_1, R_2, R_3, R_4 — постоянные сопротивления;

R_x — изменение сопротивления вследствие внешнего воздействия (входная величина);

r — сопротивление реохорда;

r_x — часть сопротивления реохорда, соответствующая внешнему воздействию (выходная величина).

Условия равновесия моста при отсутствии внешнего воздействия $R_x = 0, r_x = 0$

$$R_1(R_4 - r) = R_2 R_3. \quad (18)$$

Если появилось внешнее воздействие, т. е. $R_x \neq 0, r_x \neq 0$, то условие равновесия

$$R_1(R_4 + R_4 + r - r_x) = R_2(R_3 + r_x). \quad (19)$$

Вычитаем выражение (19) из (18) и после упрощений получаем

$$r_x = R_x \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (20)$$

Выражение (20) представляет собой линейную функцию $r_x(R_x)$, что при равномерной шкале означает отсутствие погрешности, обусловленной схемой.

Пример 9.3

При перемещении измерительного стержня W в первичном индуктивном преобразователе, построенном по мостовой электросхеме, изменяется индуктивное сопротивление катушек преобразователя, в результате чего в диагонали моста появляется неуравновешенное напряжение U_0 (выходная величина). Входной величиной является изменение индуктивности катушек. Связь между входом и выходом выражена в комплексной форме.

$$U_0 = \frac{U_1}{U_2} \left(\frac{r^2 \varepsilon_r + \omega^2 L^2 \varepsilon_L}{r^2 + \omega^2 L^2} + j\omega L r \frac{\varepsilon_L - \varepsilon_r}{r^2 + \omega^2 L^2} \right) \quad (21)$$

U_1 — напряжение питания;

r — активное сопротивление одной катушки;

L — индуктивность катушки;

ω — угловая частота питающего напряжения;

$\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L}$ — относительное изменение индуктивности катуш-

Точность измерительных приборов

ки;

$\epsilon_r = \frac{\Delta r}{r}$ — относительное изменение активной составляющей полного сопротивления катушки.

Формула (21) выражает нелинейную связь между входом и выходом, поэтому при равномерной шкале будет иметь место погрешность, обусловленная схемой ИУ.

Метод преобразованной электрической цепи дает возможность, определить результат действия первичной погрешности на выходное напряжение. К первичным погрешностям электрической цепи относятся: погрешности омических сопротивлений, сил тока, индуктивностей, емкостей и других электрических параметров. Представим в виде блока электрическую цепь с напряжением E на входе и U_{ab} — на выходе. Выделим из блока один элемент — сопротивление R_s с погрешностью ΔR_s (рис. 19,а).

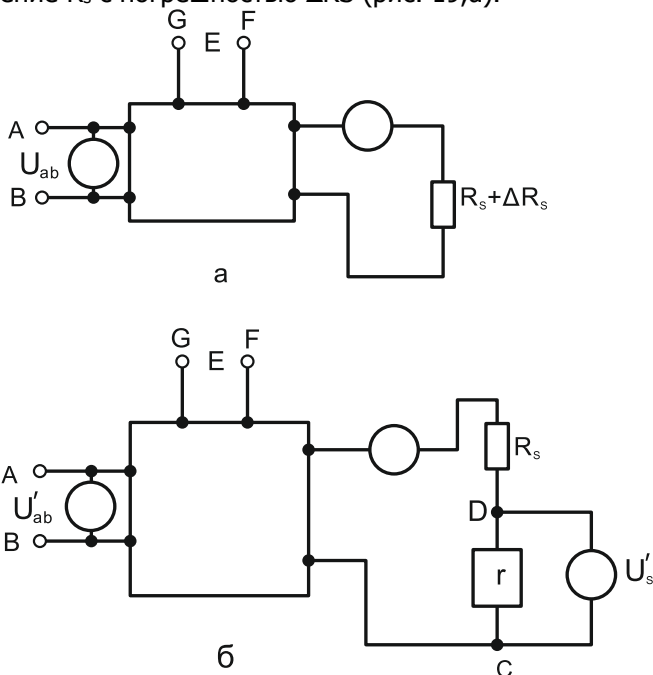


Рис. 19. Блок электрической цепи с выделенным сопротивлением (а) и преобразованная электрическая цепь, в которой погрешность ΔR_s моделируется с помощью генератора Γ (б)

Точность измерительных приборов

Напомним, что задача о влиянии ΔR_s на U_s решается приближенно, в рамках линейной теории точности. При построении преобразованной электрической цепи моделируем первичную погрешность ΔR_s с помощью дополнительного генератора с электродвижущей силой $U_s' = \mu \Delta e_s$, где μ — масштаб, в котором представлено действительное падение напряжения, вызванное увеличением сопротивления R_s на ΔR_s . Падение напряжения на участке CD (рис. 19, б)

$$\Delta e_s = - (i_s + \Delta i_s) \Delta R_s \approx - i_s \Delta R_s$$

Знак минус означает, что дополнительный источник питания создает между полюсами С и D ток, противоположный основному току. Если замкнуть полюса на входе и включить дополнительный генератор с напряжением U_s' , то на выходе будет напряжение U_{ab}' , представляющее собой результат влияния первичной погрешности ΔR_s в масштабе μ . Выходное напряжение преобразованной цепи

$$U_{ab}' = \mu \Delta U_s,$$

где ΔU_s — искомая погрешность выходного напряжения.

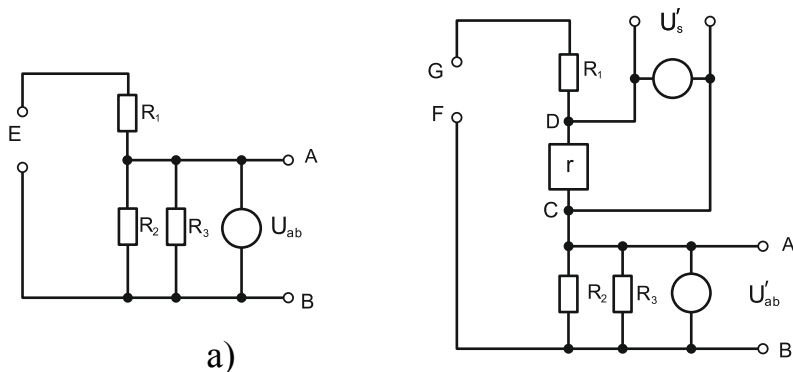


Рис. 20. Делитель напряжения (а) и преобразованная электрическая цепь, в которой погрешность ΔR_s моделируется с помощью генератора Γ

Так как

$$\mu = \frac{U_s}{\Delta e_s}; \quad e_s = - i_s \Delta R_s,$$

то

Точность измерительных приборов

$$\Delta U_s = \frac{U_{ab}}{\mu} = \frac{U_{ab} \Delta e_s}{U_s} = - \frac{U_{ab}}{U_s} i_s \Delta R_s \quad (22)$$

В формулах левые части равны, следовательно, равны и правые

$$E \left(\frac{\partial f}{\partial R_s} \right)_0 \Delta R_s = \frac{U_{ab}}{U_s} i_s \Delta R_s$$

Отсюда значение частной производной

$$\left(\frac{\partial f}{\partial R_s} \right)_0 = \frac{i_s}{E} * \frac{U_{ab}}{U_s} \quad (23)$$

Отношение $\frac{i_s}{E}$ определяют из заданной цепи, отношение $\frac{U_{ab}}{U_s}$ из преобразованной цепи.

Пример 9.4

Основная схема делителя напряжения (рис. 20, а) содержит три постоянных сопротивления. Найти погрешность выходного сопротивления ΔU_1 вызванную первичной погрешностью ΔR_1 (погрешностью сопротивления R_1). При построении преобразованной электрической цепи (рис. 20,б) закорачиваем полюса на входе и включаем на участке CD дополнительный генератор Г. Далее применим формулу (23) для определения частной производной. Из основной цепи находим отношение $\frac{i_1}{E}$, так как $E = i R_{\Sigma}$,

$$\text{то } \frac{i_1}{E} = \frac{1}{R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}}$$

Для определения отношения $\frac{U_{ab}}{U_1}$ находим вначале напряжение на выходе преобразованной электрической цепи, рассматривая контур AR_2R_3B и применяя второй закон Кирхгофа, $U_{ab1} = i_1 \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$;

то же для контура $DR_1R_2R_3C$: $U_1 = i_1 \left(R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} \right)$; $\frac{U_{ab}}{U_1}$

Точность измерительных приборов

$$= \frac{\frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}}{R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}}$$

Погрешность выходного напряжения, вызванная первичной погрешностью ΔR_1 .

$$\Delta U_1 = E \left(\frac{\partial f}{\Delta R_1} \right) \Delta R_1 = -E \frac{\frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}}{R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}} \Delta R_1$$

Теперь найдем погрешность выходного напряжения ΔU_2 , вызванную ΔR_2 — погрешностью сопротивления R_2 . При построении преобразованной электрической цепи дополнительный генератор напряжением U_2' включаем перед сопротивлением R_2 . Из преобразованной схемы следует, что

$$U_2' = i_2 R_2 + \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}};$$

$$U_{ab2}' = i_2 (R_2 + R_3);$$

$$\frac{U_{ab2}'}{U_2} = \frac{R_2 + R_3}{R_2 + \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}}}$$

Погрешность выходного напряжения, вызванная первичной погрешностью ΔR_2 , $\Delta U_2 = -E \frac{R_2 + R_3}{(R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}})(R_2 + \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}})} \Delta R_2$

Таким же способом определяем результат действия погрешности ΔR_3 .

$$U_3' = i_3 \left(R_3 + \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \right);$$

$$U_{ab3}' = i_3 R_3.$$

$$\frac{U_{ab3}'}{U_3} = \frac{R_3}{R_3 + \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}}$$

Погрешность выходного напряжения, вызванная первичной погрешностью ΔR_3 , $\Delta U_3 = -E \frac{R_3}{(R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}})(R_3 + \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}})} \Delta R_3.$

10. ВЛИЯНИЕ ВЕКТОРНЫХ ПЕРВИЧНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НА ПОКАЗАНИЯ ИУ

Первичные погрешности называются векторными, если они заданы не только величиной, но и углом, определяющим направление вектора на плоскости или в пространстве. Длину вектора называют его модулем. Положение вектора на плоскости определяется одним углом, в пространстве — двумя углами.

По сравнению с методами решения задач, где заданы скалярные погрешности, вопрос о влиянии векторных погрешностей на показания ИУ является более сложным, потому что необходимо рассматривать как случайную не только величину (модуль) векторной погрешности, но и углы, определяющие направление вектора в начальной фазе. Как правило, векторная первичная погрешность дает на выходе ИУ также векторную погрешность показаний. Если погрешность представлена функцией

$$\Delta\varphi = a \sin(\varphi + \psi),$$

где

a — амплитуда;

ψ — угол начальной фазы (случайный);

φ — неслучайный угол,

то такая погрешность относится также к векторным, поскольку синусоиду можно представить с помощью вращающегося вектора. В частности, кинематическая погрешность зубчатого колеса является векторной, так как аппроксимируется синусоидой.

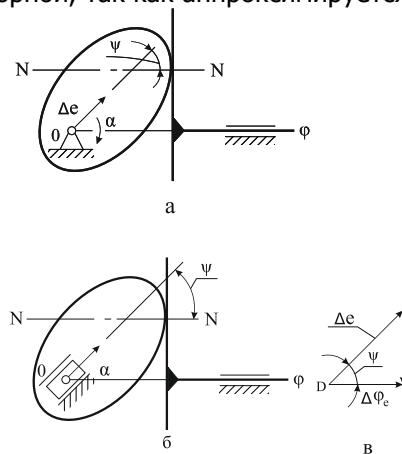


Рис. 21. Передача от кулачка к толкателю

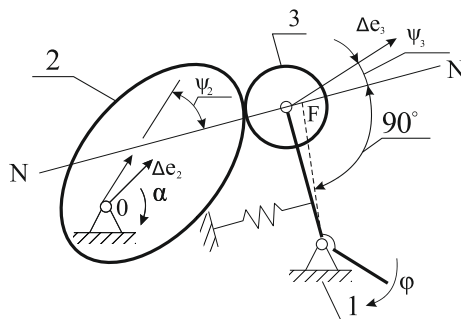


Рис. 22. Передача от кулачка к рычагу 1 - корпус; 2 - кулачок; 3 - ролик

Математическое описание ИУ обычно не содержит параметров, погрешности которых можно отнести к векторным (например, эксцентриситеты и перекосы осей). Поэтому определение результата действия векторной погрешности на выходную величину базируется на методе преобразованной схемы. Изучение многих примеров привело к общему выводу; результат действия векторной погрешности на выходную величину определяют проектированием вектора на нормаль к поверхностям в точке касания элементов кинематических пар.

Пример 10.1

В передаче от кулачка к толкателю (рис. 21, а) входная величина α — угол поворота кулачка, выходная величина φ — координата, определяющая положение толкателя на оси Of . NN — нормаль к поверхностям кулачка и толкателя в точке их касания. Заданы: эксцентриситет Δe и угол ψ , определяющий направление вектора эксцентриситета в начальном положении. Следуя приведенному выше правилу, находим, $\Delta\varphi_e$ — погрешность положения толкателя в зависимости от эксцентриситета кулачка как проекцию Δe на направление нормали NN ; $\Delta\varphi_e = \Delta e \cos(\alpha + \psi)$,

Преобразованный механизм (рис. 21, б) и план малых перемещений для него (рис. 21, в) согласуются с указанным правилом определения результата действия векторной погрешности.

Пример 10.2

В передаче от кулачка к рычагу (рис. 22) входная величина α — угол поворота кулачка, выходная величина φ — угол поворота рычага. Заданы эксцентриситеты Δe_2 кулачка и Δe_3 ролика. Требуется определить погрешности положений рычага в зависимости от Δe_2 и Δe_3 .

Проектируем векторы Δe_2 и Δe_3 на нормаль NN. Для выражения проекции векторов в угловой мере (при задании эксцентриситета в линейной мере) следует проекции разделить на расстояние CF от нормали NN до оси C поворота рычага. Получаем

$$\Delta \varphi_{e2} = \frac{1}{CF} \Delta e_2 \cos(\alpha + \psi_2);$$

$$\Delta \varphi_{e3} = - \frac{1}{CF} \Delta e_3 \cos(\beta + \psi_3);$$

где β — угол поворота ролика;

ψ_2 и ψ_3 — углы, определяющие направление векторов в начальном положении.

Знак минус во второй формуле объясняется следующим: в результате эксцентриситета Δe_3 ролика смещается весь ролик в указанном направлении, однако отрыва поверхностей не произойдет благодаря действию пружины, заставляющей повернуться рычаг в направлении, обратном направлению эксцентриситета. Из этого следует вывод: эксцентриситет ведомого звена вызывает погрешность его положения с противоположным знаком. Эксцентриситет ведущего звена вызывает погрешность положения ведомого звена с тем же знаком.

Пример 10.3

Для круговой шкалы ИУ (рис. 23) требуется определить погрешность показаний ИУ, вызванную эксцентриситетом шкалы $\Delta e_{ш}$. Результат действия эксцентриситета определяют также с помощью проектирования вектора на нормаль NN, но эту нормаль строят по отношению к направлению стрелки.

Погрешность показаний, вызванная эксцентриситетом шкалы,

$$\Delta \varphi_{еш} = - \Delta e_{ш} \cos \psi,$$

где ψ — угол между вектором $\Delta e_{ш}$ и нормалью NN.

Целесообразно выражать $\Delta e_{ш}$ через цену деления шкалы c и длину деления a :

Точность измерительных приборов

$$\Delta f_{\text{еш}} = - \Delta e_{\text{ш}} \cos \psi * \frac{c}{a} .$$

Числовой пример: $\Delta e_{\text{ш}} = 0,3 \text{ мм}$; $\psi = 0$; $c = 0,01 \text{ мм}$; $a = 1,5 \text{ мм}$. Погрешность показаний $\Delta f_{\text{еш}} = - 0,3 * 1 \frac{0,01}{1,5} = -0,002$

Знак минус следует из того, что неподвижную шкалу рассматривают как ведомое звено. Если в ИУ вращается шкала (при неподвижной стрелке), то погрешность показаний будет иметь тот же знак, что и проекция эксцентриситета $\Delta e_{\text{ш}}$, Т. е. в случае подвижной шкалы при неподвижном указателе шкалу рассматривают как ведущее звено механизма.

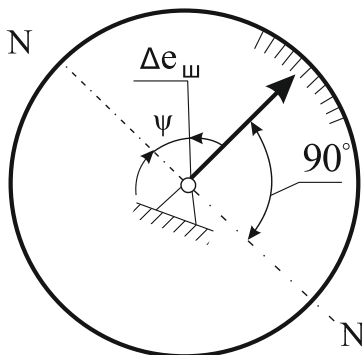


Рис. 23. Эксцентриситет круговой шкалы

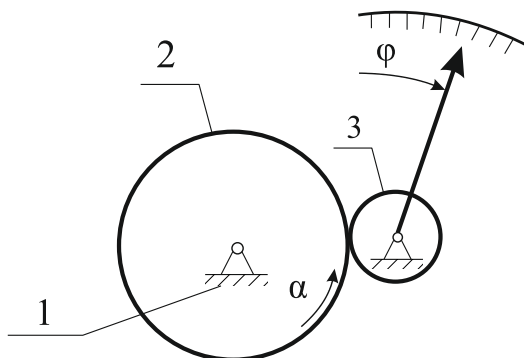


Рис. 24. Зубчатая передача прибора: 1 - корпус; 2 - ведущее колесо; 3 - ведомое колесо

Пример 10.4

Для зубчатой передачи (24) с числом зубьев $z_2 = 80$ и $z_3 = 16$ (модуль $m = 0,15$) задана кинематическая погрешность зубчатых колес (степень точности 6): $\delta F_{\Sigma 2} = \delta F_{\Sigma 3} = 20$ мкм. Требуется определить наибольшую возможную погрешность показаний ИУ в зависимости от $\delta F_{\Sigma 2}$ и $\delta F_{\Sigma 3}$.

Погрешность показаний ИУ соответствует погрешности положения стрелки, жестко связанной с колесом 3. Поэтому определим погрешности положения колеса 3: $\Delta \varphi_2$ — в зависимости от погрешности колеса 2, $\Delta \varphi_3$ — в зависимости от собственной погрешности.

Экспериментально установлено, что в большинстве случаев измеренную кинематическую погрешность зубчатого колеса можно аппроксимировать синусоидой с амплитудой $\frac{1}{2} \delta F_{\Sigma}$ (так как величина δF_{Σ} представляет собой ширину зоны погрешностей) и начальной фазой ψ (рис. 46).

Результат действия кинематической погрешности колеса выражаем в угловых единицах путем деления $\frac{\delta F_{\Sigma}}{2}$ на радиус делительной окружности r .

Результат действия первичной погрешности $\delta F_{\Sigma 2}$ на положение стрелки выражаем в угловых единицах $\Delta \varphi_2 = - \frac{\delta F_{\Sigma 2}}{2R_2} \sin(\alpha + \psi_2)$

где α — угол поворота колеса 2;

ψ_2 — угол начальной фазы для колеса 2 (о знаке см. ниже);

r_3 — радиус делительной окружности колеса 3 ($r_3 = 1,2$ мм).

Результат действия первичной погрешности $\delta F_{\Sigma 3}$:

$$\Delta \varphi_3 = - \frac{\delta F_{\Sigma 3}}{2R_3} \sin(\alpha + \psi_3)$$

где φ — угол поворота колеса 3;

ψ_3 — угол начальной фазы для колеса 3,

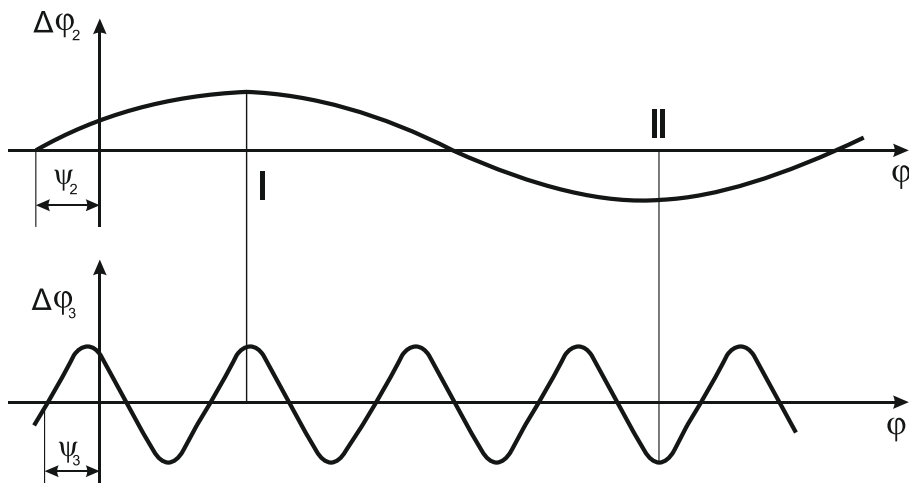


Рис. 25. Кинематические погрешности зубчатых колес 2 и 3 (см. рис. 24), аппроксимированные синусоидами.

При определении знаков будем руководствоваться следующим правилом: погрешность положения ведущего колеса вызывает погрешность положения ведомого колеса с обратным знаком. Например, увеличение шага зубьев ведущего колеса ведет к отставанию ведомого колеса.

Погрешность положения ведомого колеса в зависимости от собственной кинематической погрешности знака не меняет, поэтому для $\Delta\varphi_3$ указан знак « + ». Наибольшее возможное значение суммарной погрешности будет при $\sin(\alpha + \psi_2) = -1$ и $\sin(\varphi + \psi_3) = +1$.

$$\Delta\varphi_{2\max} = -\frac{20}{2 \cdot 1200} (-1) = \frac{1}{120} \text{ рад};$$

$$\Delta\varphi_{3\max} = \frac{20}{2 \cdot 1200} = \frac{1}{120} \text{ рад.}$$

Результат совместного действия

$$\Delta\varphi_{\Sigma\max} = \Delta\varphi_{2\max} + \Delta\varphi_{3\max} = \frac{1+1}{120} = \frac{1}{60} \text{ рад.}$$

Погрешность показаний соответствует погрешности поворота стрелки из первого положения во второе (при этом погрешность во втором положении отличается только знаком).

Определяем погрешность поворота, равную разности погрешностей положения в точках I и II.

Точность измерительных приборов

$$\Delta\varphi_{II} = \Delta\varphi_{\max}^{II} - \Delta\varphi_{\max}^I = -\frac{1}{60} - \frac{1}{60} = -\frac{1}{30} \text{ рад.}$$

Если на полной окружности шкалы нанесено 200 делений, то

$$\Delta\varphi_{II} = -\frac{1}{30} * \frac{200}{2\pi} = -1 \text{ дел. шкалы.}$$

Таково наибольшее возможное значение погрешности показаний ИУ при заданных допусках на кинематическую погрешность зубчатых колес.

Пример 10.5

Рассмотрим передачу от кулачка к толкателю при перекосе оси кулачка (рис. 26). Условимся, что положение кулачка в корпусе определяется точкой O , взятой в центре нормального сечения кулачка на высоте $b/2$. Пунктиром показано идеальное положение кулачка. Перекос оси кулачка относительно оси вала, на который он насажен, определяем как поворот на угол $\Delta\gamma$ оси кулачка вокруг прямой AA , лежащей в среднем сечении кулачка. Прямая AA образует с осью $O\varphi$ угол ψ_γ . Точка C верхнего торца займет после перекоса оси положение C' . Проекция дуги CC' на плоскость среднего сечения дает отрезок OD . Считая пренебрежимо малой разность между дугой CC' и прямой OD принимаем $OD \approx CC' = \frac{b}{2} \Delta\gamma$.

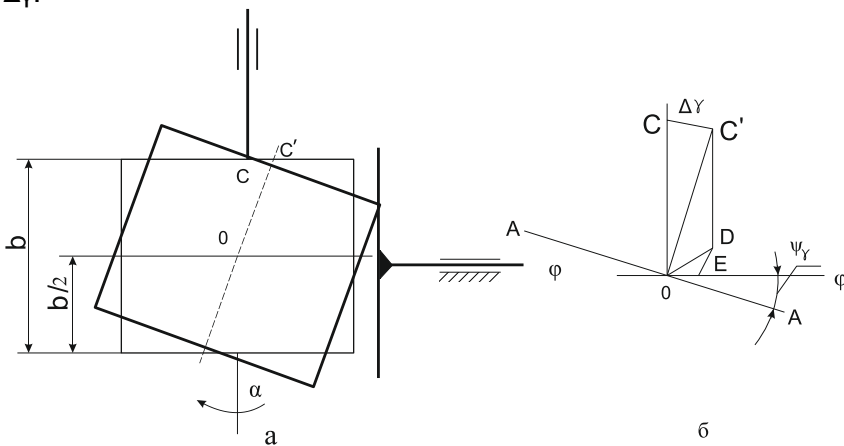


Рис. 26. Плоская (а) и пространственная (б) схемы перекоса оси кулачка.

С достаточным приближением перекося оси кулачка можно рассматривать как эксцентриситеты торцов кулачка, направленные в противоположные стороны.

Проекция отрезка OD на направление $O\phi$ дает величину OE , представляющую собой погрешность положения толкателя, вызванную перекосям оси кулачка, $\Delta\varphi_{\gamma} = \frac{b}{2} \Delta\gamma \cos\left(\frac{\pi}{2} - \psi_{\gamma}\right) = \frac{b}{2} \Delta\gamma \sin\psi_{\gamma}$;

При повороте кулачка на угол α верхний торец коснется толкателя при условии $0 \leq \alpha + \psi_{\gamma} \leq \pi$. При выходе угла $\alpha + \psi_{\gamma}$ за эти пределы вступит в действие нижний торец кулачка. Функция $\Delta\varphi_{\gamma}(\alpha)$ показана на рисунке 27, где сплошная линия соответствует касанию верхнего торца, пунктирная — нижнего торца. Практически касание возможно только при положительных значениях $\Delta\varphi_{\gamma}$, поэтому $\Delta\varphi_{\gamma} = \frac{b}{2} \Delta\gamma |\sin(\alpha + \psi_{\gamma})|$,

Пример 10.6

При перекося оси вала (рис. 28) в передаче от кулачка к толкателю погрешность положения толкателя не зависит от угла поворота кулачка, так как положение оси вала постоянно (определяется положением оси подшипников),

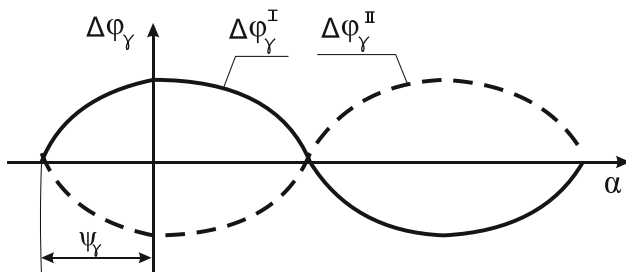


Рис. 27. Изменение погрешности положения толкателя в зависимости от угла α поворота кулачка

Точность измерительных приборов

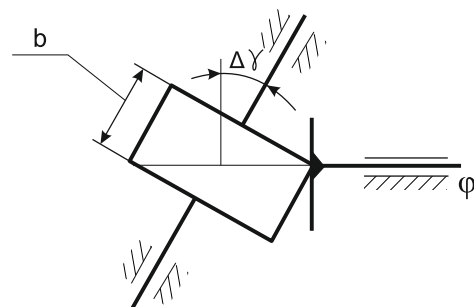


Рис. 28. Схема перекоса оси вала кулачка

В примерах 11.5 и 11.6 произведение $\frac{b}{2} \Delta\gamma$ рассматривается как модуль эксцентриситета.

В заключение необходимо рассмотреть вопрос о влиянии зазоров в опорах на показание ИУ. Зазоры в опорах вызывают эксцентриситет оси и особенность учета этого влияния состоит в том, что направление вектора эксцентриситета не случайное. Оно определяется направлением равнодействующих двух сил: измерительного усилия и силы трения в опорах. При обратном ходе измерительного стержня направление измерительного усилия остается тем же, что и при прямом ходе, но сила трения меняет знак. Поэтому и возникают различные погрешности показаний ИУ при прямом и обратном ходе. Зазор в опорах следует рассматривать не как первичную погрешность, а как причину, вызывающую появление первичной погрешности — эксцентриситета оси. Влияние эксцентриситета оси звена на показание ИУ было рассмотрено в настоящем параграфе.

11. ЗАДАЧИ ПО ТОЧНОСТИ ПРИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ВХОДОМ И ВЫХОДОМ ИУ

Для описания некоторых устройств применяют обыкновенные дифференциальные уравнения вида $F(\varphi^n, \varphi^{n-1}, \dots, \varphi, t, q_s) = 0$,

$$s = 1, 2, 3, \dots, S, \quad (24)$$

где φ - координата, определяющая состояние выходной величины;

n — порядок дифференцирования;

t — текущее время работы устройства;

q_s — постоянные параметры;

s — номер параметра (s_1 относится к корпусу);

S — количество учитываемых параметров.

В механизме с одним ведущим звеном может быть реализована зависимость в виде производной от φ_0 (индексом «0» обозначена функция без погрешностей)

$$\frac{d\varphi_0}{dq_2} = f_0(q_2, q_s), s = 3, 4, \dots, S, \quad (25).$$

где q_2 - координата ведущего звена;

q_s —размеры звеньев без погрешностей.

Выражение (25) относится к идеальным условиям работы устройства. В реальных условиях осуществляется зависимость

$$\frac{d\varphi_s}{dq_2} = f(q_2, q_s + \Delta q_s)$$

Определяем погрешность как разность

$$\frac{d\varphi_s}{dq_2} - \frac{d\varphi_0}{dq_2} = f(q_2, q_s + \Delta q_s) - f_0(q_2, q_s); d\varphi_s - d\varphi_0$$

$$= d(\varphi_s - \varphi_0) = d(\Delta\varphi_s)$$

Находим результат действия одной первичной погрешности номер S на выходную величину:

$$\frac{d(\Delta\varphi_s)}{dq_2} = f(q_2, q_s + \Delta q_s) - f_0(q_2, q_s)$$

Получили выражение для дифференциала погрешности. Правая часть может быть нелинейной функцией. Разлагая первый член правой части в ряд Тейлора и ограничиваясь членом, содержащим погрешность Δq_s в первой степени, приходим к реше-

Точность измерительных приборов

нию, соответствующему линейной теории точности:

$$\frac{d(\Delta\varphi_s)}{dq_2} \approx \left(\frac{\partial f}{\partial q_s}\right)_0 \Delta q_s \quad (26)$$

Результат совместного действия первичных погрешностей определяем суммированием:

$$\frac{d(\Delta\varphi_\Sigma)}{dq_2} = \sum_{s=3}^s \frac{d(\Delta\varphi_s)}{dq_2} \quad (27)$$

Чтобы найти значение $\Delta\varphi_\Sigma$, умножаем обе части равенств (25) — (27) на dq_2 и интегрируем их в пределах от начального значения q_2^0 до текущего q_2 .

$$\Delta\varphi_s = \Delta\varphi^0 + \int_{q_2^0}^{q_2} [f(q_2, q_s, + \Delta q_s) - f_0(q_2, q_s)] dq_2 ; \quad (28)$$

$$\Delta\varphi_s \approx \Delta\varphi^0 + \int_{q_2^0}^{q_2} \left(\frac{\partial f}{\partial q_s}\right)_0 \Delta q_s dq_2 \quad (29)$$

$$\Delta\varphi_\Sigma = \sum_s \Delta\varphi_s \quad (30)$$

где $\Delta\varphi^0$ — постоянная интегрирования (погрешность положения

выходной величины в начальный момент времени). Формула (28) дает решение при задании нелинейной функции, формула (29)—приближенное решение в рамках линейной теории точности. Интегралы, стоящие в правой части равенств, зависят не только от границ интегрирования и не только от значений первичных погрешностей Δq_s в начальном и текущем положениях устройства, но и от значений Δq_s во всех промежуточных положениях. Поэтому для определения погрешности положения в случае дифференциальной зависимости необходимо знать закон изменения этих погрешностей в зависимости от координат ведущего звена.

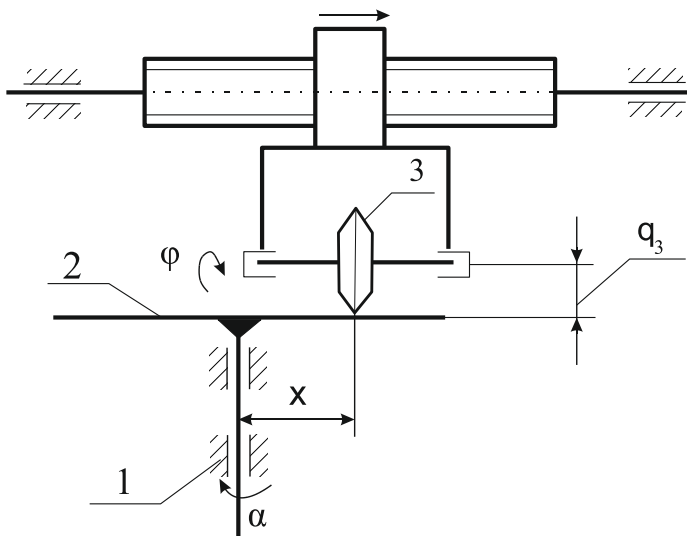


Рис. 29. Схема лобовой фрикционной передачи

Пример 11.1

В лобовой фрикционной передаче (рис. 29), применяемой в счетно-решающих устройствах, входная величина α — угол поворота диска 2 (здесь α выполняет роль параметра q_2 в формуле 24), выходная величина φ — угол поворота ролика 3 (1 — корпус). Угол φ соответствует произведению величин x и α , при этом x задано в виде функции от α .

Закон движения ролика находим из условия, что скорости звеньев 2 и 3 в точке их касания равны $\frac{d\varphi_0}{dt} q_3 = \frac{d\alpha}{dt} (\alpha)$,

где t — время.

$$\text{Отсюда } \frac{d\varphi_0}{d\alpha} = \frac{x(\alpha)}{q_3}$$

Предположим, что задана первичная погрешность Δx как функция от α , т. е. $\Delta x(\alpha)$. Реальная зависимость будет $\frac{d\varphi_x}{d\alpha} =$

$$\frac{1}{q_3} [x(\alpha) + \Delta x(\alpha)].$$

Погрешность на выходе устройства $\frac{d\varphi}{d\alpha} \frac{d\varphi_0}{d\alpha} = \frac{1}{q_3} [x(\alpha) + \Delta x(\alpha)]$.

Точность измерительных приборов

$$\text{Или } \frac{d(\Delta\varphi_x)}{d\alpha} = \frac{\Delta x(\alpha)}{q_z},$$

$$\text{Интегрируем } \Delta\varphi_x = \Delta\varphi_x^0 + \frac{1}{q_z} \int_{\alpha_0}^{\alpha} \Delta x(\alpha) d\alpha,$$

где $\Delta\varphi_x^0$ — постоянная интегрирования — представляет собой погрешность положения в начале движения.

В тех случаях, когда погрешность задана в виде конечных разностей (например, разности соседних шагов у зубчатых колес), полную погрешность определяют методами, разработанными в теории конечных разностей.

12. УНИФИЦИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА

12.1 Основные положения

Массовость выпускаемой продукции при всё возрастающих требованиях к ее качеству в условиях экономической оптимизации привела к необходимости создания автоматизированных систем управления качеством (АСУК) и автоматических систем управления технологическим процессом (АСУТП). При этом необходимо отметить что в условиях АСУТП контроль органически связан с процессом производства и является его неотъемлемой частью.

В настоящее время существует большое число разнотипных информационно-измерительных преобразователей (ИИП) – емкостные, индуктивные, механотронные, реостатные, фазовые струнные, вибрационно-частотные, пневмоэлектрические и другие, позволяющие преобразовывать различные физические величины в электрический выходной сигнал.

Причем различные физические принципы, используемые при их разработке а также их различное конструктивное оформление привело к тому, что для измерения одного и того же параметра в одних и тех же условиях применяют десятки различных информационно-измерительных устройств (ИИУ) с различными метрологическими характеристиками. При этом появление нового физического принципа влечет за собой разработку новых конструкции ИИУ.

Область применения любого ИИП одного типа в большинстве случаев обеспечивает контроль одной-двух физических величин, в то время как в технологических процессах приходится контролировать пять-десять и более физических параметров.

Стремление организаций создавать свои информационно-измерительные преобразователи вызывает большие непроизводительные затраты в масштабах страны, что особенно существенно при создании АСУТП. Так, для линейных измерений используют более десяти ИИП с аналогичными метрологическими характеристиками. Такое же положение при измерении температуры, давления и других физических величин,

В то же время нецелесообразно для АСУТП применять ИИП

Точность измерительных приборов

различных принципов и конструкций, часть которых выдают сигнал в дискретной форме, часть — в аналоговой (этот сигнал в дальнейшем должен еще преобразовываться для использования в ЦВМ). Подобная практика влечет за собой, во-первых, резкое увеличение номенклатуры информационно-измерительных преобразователей; во-вторых, разработку большого количества сопутствующих им промежуточных преобразующих блоков; в-третьих, снижение надежности и качества контроля технологических параметров; в-четвертых, разработку морально устаревших устройств, не обеспечивающих должного экономического и технического эффекта.

Отсутствие единого направления работ по обеспечению АСУТП информационно-измерительными системами может привести к большим непроизводительным затратам как по отдельным отраслям, так и в масштабе народного хозяйства страны в целом.

Чтобы исключить разнотипность ИИП и снизить затраты на них, необходимо разработать пути их унификации и создания унифицированной информационно-измерительной системы метрологического обеспечения (УИИС МО) производственных процессов, четко сформулировать и узаконить основные требования к таким системам, определить область их применения в автоматизированных (АСУТП, АСУК и др.) и неавтоматизированных производственных процессах.

Такая система должна состоять из ИИП, выходной сигнал которого должен быть унифицирован, и восприниматься стандартизованными приборами (частотомер, статанализатор, цифropечатающее устройство, ЦВМ и др.), входящими составными частями в общую систему контроля (управления) качества (АСУТП, АСУК и др.).

12.2 Основные требования к ИИП в условиях АСУТП

1. Объективность и достоверность измерительной информации о состоянии контролируемого объекта.
2. Измерительная информация о состоянии контролируемой физической величины должна выдаваться без каких-либо промежуточных преобразований непосредственно в ЭЦВМ, статанализатор, цифropечатающие машины и другие подобные устройства.
3. Измерительная система должна обеспечивать возможность быстрой перестройки при смене технологических процессов

Точность измерительных приборов

и быть унифицированной при измерении различных физических параметров при незначительных изменениях отдельных блоков этой системы.

4. Измерительная, система должна иметь метрологические характеристики, обеспечивающие требуемую точность, надежность контроля и высокую производительность.

5. Измерительная система должна обладать возможностью дистанционного измерения, быть простой и надежной при настройке и проверке в условиях эксплуатации.

Отсюда представляется весьма перспективным разработка унифицированных по принципу действия и выходному сигналу информационно-измерительных преобразователей и создание унифицированных информационно-измерительных систем (УИИС).

Весьма существенным при этом является параметр, несущий информацию от ИИП. В связи с развитием цифровой вычислительной техники, созданием электронных цифровых управляющих машин наиболее удобной формой представления информации от преобразователя является кодо-импульсная, а также частотно-импульсная модуляция.

На сегодняшний день точность воспроизведения эталона частоты равна $\pm 3 \cdot 10^{-12}$ и является самой высокой. Промышленностью освоены и выпускаются стандартные частотоизмерительные цифровые устройства, позволяющие без каких-либо затруднений измерять частоту с погрешностью 10^{-7} — 10^{-8} в промышленных условиях.

Частота является параметром, который может передаваться на значительные расстояния без внесения существенных погрешностей. Высокая помехоустойчивость и помехозащищенность частотопередающих трактов являются весьма существенным фактором, предопределяющим широкое практическое применение частотных преобразователей.

В связи с тем, что точность измерения частоты значительно превышает точность измерения любой другой физической величины, естественно стремление метрологов свести измерение любой физической величины к измерению частоты. Поэтому наиболее перспективным направлением в измерительной технике являются измерения различных физических величин путем преобразования в частоту. При этом использование частоты при измерении для получения информации в дискретной форме является одним из существенных моментов для современной измерительной и управляющей техники. Цифровые информационно-

измерительные устройства с частотным преобразователем все более широко применяются на практике.

В настоящее время частотные преобразователи используют для точного измерения почти всех наиболее распространенных в практике измерений физических величин. Поэтому представляется весьма перспективной разработка унифицированных по принципу действия и выходному сигналу преобразователей, которые позволили бы измерять несколько физических величин без существенного изменения их конструкции. В качестве таких информационно-измерительных преобразователей для измерения различных физических величин наряду с другими могут быть использованы и струнные преобразователи.

12.3. УИИС со струнным преобразователем

Отличительной особенностью струнного преобразователя является возможность изменения его диапазона измерения в 10—100 раз путем незначительного изменения отдельных элементов конструкции. Таким образом, на базе одной конструкции может быть создано много унифицированных преобразователей различных физических величин в частоту.

Выходной частотно-модулированный сигнал таких преобразователей легко преобразуется в форму кода практически без потери точности. Разработанные преобразователи легко собрать в измерительные комплексы для использования в АСУТП.

Единство метода измерения и унификация конструкций струнных преобразователей позволяют создать метрологическую систему обеспечения АСУТП, отличающуюся высокими метрологическими характеристиками, надежностью, универсальностью и высокими экономическими показателями.

В струнных информационно-измерительных преобразователях измеряемая величина преобразуется в изменение частоты собственных поперечных колебаний тонкой натянутой струны

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F_0}{\rho S}} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F_0}{m_c l}} \quad (31)$$

где F_0 — сила натяжения струны; ρ — плотность материала струны; S — площадь поперечного сечения струны; m_c — масса струны; l — длина струны.

В современных измерительных струнных преобразователях струна, помещенная в поле постоянных магнитов, и электронный усилитель с положительной обратной связью образуют

Точность измерительных приборов

автогенератор, в котором поддерживаются незатухающие колебания струны на частоте, практически равной частоте ее собственных колебаний. Воздействуя на натяжение, деформацию или массу t_c струны, можно построить унифицированную систему преобразователей, позволяющих измерять различные физические величины: линейное и угловое перемещение, температуру, давление, силу, электрический ток и напряжение и др.

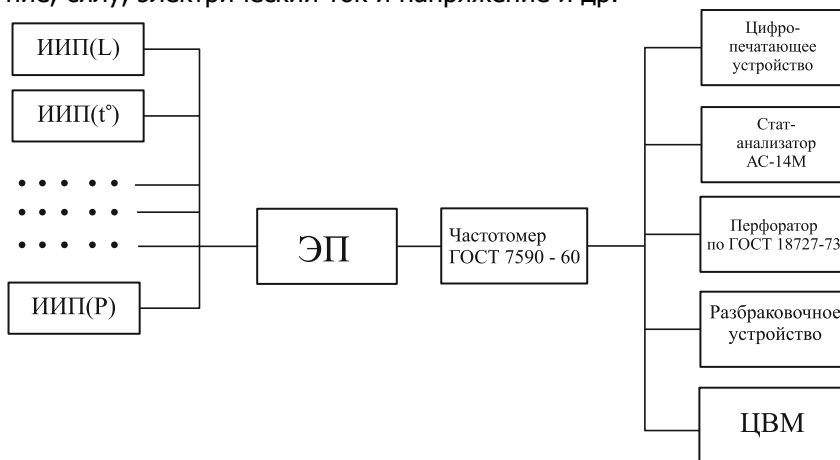


Рис. 30. Структурная схема системы.

Кафедрой «Метрология электронной техники» Московского института электронного машиностроения (МИЭМ) была проведена работа, позволившая обобщить опыт работы различных организаций в направлении создания струнных преобразователей.

Теоретические и экспериментальные исследования струнных преобразователей позволили разработать несколько унифицированных конструкций преобразователей, на базе которых создана УИИС МО технологических процессов, с помощью которой можно измерять различные физические величины. На схеме ИПП (L) — информационно-измерительный преобразователь линейных перемещений в частоту; ИПП (t°) — то же, температуры; ИПП (p) — то же, давления; ЭП — электронный преобразователь. Перечень некоторых физических величин, измеряемых УИИС МО, и метрологические характеристики преобразователей приведены в табл. 1.9.

На практике применяют струнные преобразователи двух типов: однострунные усилия (рис. 31, а), перемещения (рис.

31,б), температуры (рис. 31, в) и дифференциальные (рис. 32).

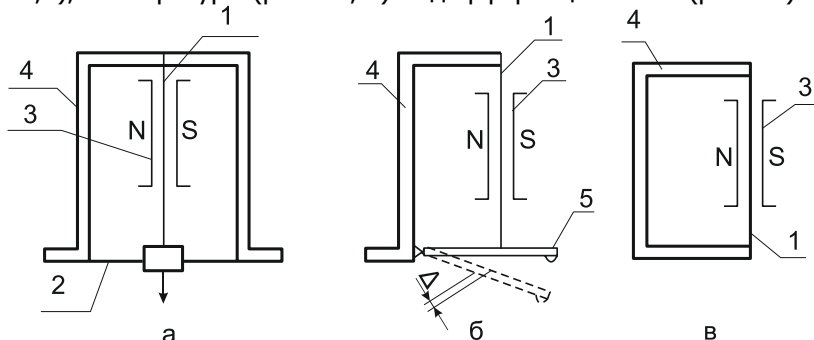


Рис. 31. Струнный преобразователи однострунных усилителей(а), перемещения(б) и температуры(в)

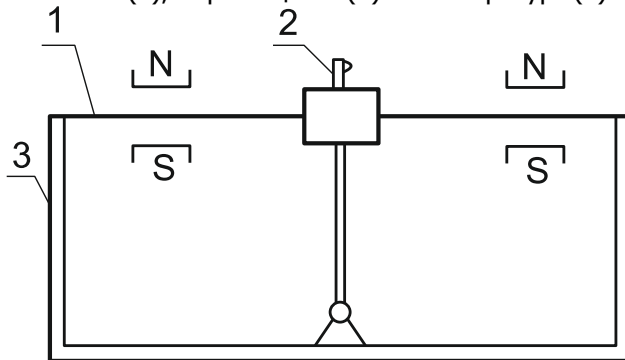


Рис. 32. Дифференциальный струнный усилитель

На рис. 31 : 1 — струна; 2— подвес; 3— магниты возбуждения; 4 — корпус; 5 — измерительный рычаг. На рис. 32 : 1— струны; 2 — измерительный рычаг; 3 — корпус.

В случае однострунных преобразователей информацию об измеряемом параметре будем иметь в виде отклонения A / частоты колебаний струны от некоторого исходного значения f_0 , определяемого из выражения.

Точность измерительных приборов

Таблица 3.

Измеряемая физическая величина	Пределы измерения	Основная погрешность, %
Линейные перемещения	0—100 мкм	0,25
Сила или вес *	0—3000 Н 0—5000 Н	0,4 0,4
Давление *	0—5*10 ³ Па 0—10 ⁴ Па 0—2,5*10 ⁴ Па 0,5-10 ⁴ Па 0—10 ⁵ Па 0—1,5*10 ⁵ Па 0—2*10 ⁵ Па 0—6*10 ⁵ Па	0,4
Температура окружающей среды *	20—50° С + 50—100° С	0,2
Температура поверхностей объектов малой площади (1—3 мм ²) *	+50—200° С + 100—400° С	2,5
Постоянный ток	1—100 мА	2,5

*По данным канд. техн. наук Карцева Е. А.

Выражение для функции преобразования при измерении усилий и деформаций будет иметь вид:

$$\Delta f = f_0 \sqrt{1+x} - f_0 = \frac{1}{2} f_0 x - \frac{1}{8} f_0 x^2 + \frac{1}{14} f_0 x^3 + \dots, \quad (32)$$

где x — относительное изменение начального натяжения или деформации струны под действием измеряемой силы или перемещения.

Один из основных недостатков однострунных преобразователей — нелинейность характеристики и смещение начального уровня — могут быть существенно уменьшены, если использовать дифференциальную схему. В этом случае измеряемый параметр воздействует на две идентичные струны, увеличивая частоту одной из них и уменьшая частоту другой.

Точность измерительных приборов

Тогда, если при измерительном воздействии

$$f_1 = f_0 \sqrt{1 + x}; \quad f_2 = f_0 \sqrt{1 - x}, \quad (33)$$

то выражение для разности частот будет иметь вид

$$\Delta f = f_1 - f_2 = f_0 x - \frac{1}{8} f_0 x^3 + \dots \quad (34)$$

Информационно-измерительные преобразователи линейных величин предназначены для измерения линейных размеров и перемещений. Применение преобразователей особенно эффективно при контроле размеров, деформаций, погрешностей расположения поверхностей деталей и узлов (параллельности торцов и перпендикулярности торцов к оси тонкостенных цилиндрических деталей), погрешностей формы деталей малой жесткости (овальности, конусности, несферичности, неплоскостности).

Геометрические размеры струн и их взаимное расположение обеспечивают небольшое измерительное усилие при контактном методе измерения линейных размеров.

От других существующих преобразователей эти преобразователи отличаются малой температурной погрешностью, что достигается путем использования в конструкции высокостабильных материалов, подбираемых специальным методом по температурным коэффициентам линейного расширения, и особым расположением поверхностей сопряжения деталей и сборочных единиц относительно осей струн.

Преобразователи силы и массы. Применение преобразователей наиболее эффективно для измерения массы вещества, различных сил, при измерении толщины напыляемого покрытия весовым методом.

Преобразователи для измерения толщины напыленного слоя. Одним из наиболее важных этапов современной технологии изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем является вакуумное напыление металлических и неметаллических пленок.

Применение унифицированных информационно-измерительных систем со струнным преобразователем позволяет получить информацию о толщине напыляемого слоя на протяжении всего технологического процесса напыления, что дает возможность вести активный контроль измеряемого параметра. Высокая чувствительность и небольшие габаритные размеры преобразователей дают возможность использовать их в лабораторных и цеховых установках, предназначенных для напыления тонких

Точность измерительных приборов

структур, которые могут быть электропроводными и неэлектропроводными.

Используя чувствительные элементы различных типоразмеров на базе одной конструкции, можно получать преобразователи с различной чувствительностью и пределами измерений.

Информационно-измерительные преобразователи угловых размеров и перемещений предназначены для измерения углов наклона плоских поверхностей в пределах действия силы тяжести, а также угловых перемещений объектов относительно некоторого положения, принятого за исходное.

Применение преобразователей особенно эффективно при контроле углового положения объектов и контроле неплоскостности деталей.

Используя преобразователи, можно косвенно измерить линейные перемещения путем преобразования их посредством синусной линейки в угловые, а также измерить угловые и линейные ускорения движущихся объектов.

Пределы измерения расширяют путем изменения геометрических параметров чувствительных элементов. Для исключения влияния вибраций и повышения линейности схему преобразователя строят по дифференциальному принципу.

Преобразователь базируется на поверхности, угловое отклонение от горизонта которой следует контролировать. При этом в случае строго горизонтального положения поверхности частоты обеих струн преобразователя будут равны между собой, а сила тяжести mg будет уравновешена силой взаимодействия инерционной массы с постоянным магнитом. При отклонении поверхности на угол α от горизонта на плоскость струн будет проецироваться составляющая силы тяжести $mg \sin \alpha$, уменьшая и увеличивая натяжение струн. Разность частот между этими струнами будет являться однозначной функцией угла наклона поверхности $\Delta f = kmg \sin \alpha$.

Таким же образом можно измерять углы наклона и в другой взаимно перпендикулярной плоскости.

Устройство для измерения угловых перемещений с цифровым отсчетом обладает высокой чувствительностью и может быть использовано для автоматизации контроля непараллельности поверхностей деталей и сборочных единиц, а также для автоматизации контроля неплоскостности поверхностей.

В некоторых случаях это устройство можно применить для

Точность измерительных приборов

точной установки плоскостей деталей и сборочных единиц под определенными углами.

Информационно-измерительные преобразователи температуры предназначены для измерения температуры в диапазоне 20—150° С. Они могут быть также использованы в лабораторных и цеховых установках для контроля и поддержания заданного уровня температуры, например, для контроля температуры в камерах тепла, в электролитических ваннах, в объемах с высокой степенью вакуума и агрессивных жидких и газообразных средах (для работы в агрессивных средах преобразователи выпускают в герметичном корпусе).

Измеряемая температура преобразуется в частоту посредством dilatометрического метода. Разность температурных коэффициентов линейного расширения преобразователя и струны, жестко закрепленной в нем, приводит к тому, что при изменении температуры изменяется упругая деформация струны, а следовательно, и частота ее резонансных колебаний. Таким образом, частота функционально связана с измеряемой температурой.

Варьируя материалом корпуса и струны, можно на базе единой конструкции получать преобразователи с различным диапазоном измерения.

Информационно-измерительные преобразователи тока предназначены для измерения постоянных и переменных токов. Их можно использовать как в лабораторных, так и цеховых измерительных и испытательных установках и стендах.

Измеряемый ток преобразуется в частоту изменением упругой деформации струны в результате теплового эффекта, развиваемого измеряемым током. Изменение упругой деформации струны изменяет частоту ее резонансных колебаний. Такой метод преобразования позволяет проводить измерения как на постоянном, так и на переменном токе. Варьируя геометрическими размерами струн и материалом, из которого они изготовлены, можно изменять чувствительность преобразователя и соответственно диапазон измерения.

Благодаря стабильным характеристикам и высокой надежности преобразователи применяют в автоматизированных и автоматических контрольных установках.

Метрологические характеристики преобразователей тока, полученные при лабораторных испытаниях, следующие:

Диапазон измерения	0—100 мА.
Чувствительность	1,5 Гц/мА

Точность измерительных приборов

Приведенная погрешность	2,5%
Частота измеряемого тока	0—10 кГц
Информационно-измерительные преобразователи	

напряжения предназначены для измерения напряжений постоянного тока. Используют их как в лабораториях, так и в цеховых измерительных и испытательных установках и стендах.

На основе унифицированной конструкции создана гамма преобразователей с различными пределами измерений. Высокое входное сопротивление преобразователя напряжения (10 МОм) обуславливает универсальность его применения. Преобразователь можно использовать не только при обычных измерениях, но и для контроля режима работы радиотехнических схем, где входное сопротивление и потребляемая мощность измерительного прибора часто имеют существенное значение.

Измеряемое напряжение в частоту преобразуется путем изменения упругой деформации струны вследствие использования промежуточного преобразования напряжения в механическое перемещение. Изменение упругой деформации струны изменяет частоту ее резонансных колебаний.

Используя струны различных типоразмеров, можно получать преобразователи с разным диапазоном измерения.

Основные метрологические характеристики струнных преобразователей .

Качество струнных преобразователей, как и любых измерительных преобразователей, зависит от чувствительности, пределов преобразования, погрешности установки на нуль, погрешности чувствительности, погрешности нелинейности.

Результаты теоретического анализа метрологических характеристик струнных преобразователей (СП) сведены в таблице 4, из которой следует:

при измерении усилий чувствительность S_N не зависит от изменения модуля упругости. Наиболее существенно сказывается нестабильность начального натяжения N_0 ;

погрешность чувствительности δS_N при измерении деформаций (перемещений) зависит от изменения модуля упругости струны E и изменения начальной деформации струн;

при измерении толщины напыляемого покрытия S_T чувствительность зависит от тех же факторов, что и при измерении деформации.

Однострунные преобразователи требуют специальных мер для исключения погрешностей установки на нуль и погрешно-

Точность измерительных приборов

сти чувствительности, а также погрешности, вызванной нелинейностью характеристики. Особенно сильно на эти погрешности влияет изменение температуры.

При измерении деформации и перемещений основная погрешность будет обусловлена изменением модуля упругости. Слагаемое $\delta U_0/U_0$ следует учитывать в том случае, если преобразователь используют для измерения перемещений, температуры, давления и толщины напыленного слоя. Здесь определяющим фактором будет разность Да коэффициентов линейного расширения корпуса и струны. При этом $\delta U_0 = l \Delta t$ и $\frac{\delta U_0}{U_0} \gg \frac{\delta E}{E}$ при $\Delta t > 1 \cdot 10^{-6}$

Характеристику дифференциального информационного преобразователя можно стабилизировать, используя методы стабилизации начальной частоты.

Характеристика	Однострунные преобразователи			Дифференциальные преобразователи		Примечание
	усилий, веса, ускорения, скорости	деформаций, перемещений, температуры, давления, расхода	Толщины напыления	усилий, веса, ускорения, скорости	деформаций, перемещений, температуры, давления, расхода	
Чувствительность	$\frac{\pi k_1}{4l\sqrt{m_c}\sqrt{N}} = S_H$	$\frac{\pi\sqrt{E}k_2}{4l\sqrt{m_c}\sqrt{u_0}} = S_H$	$\frac{\pi\sqrt{E}N\sqrt{u_0}k_3}{4l\sqrt{m_c}} = S_T$	$2S_N$	$2S_u$	-
Пределы преобразователей	$\Delta N_{\max} = (0,1+0,4)\frac{N_0}{k_1}$	$\Delta u_{\max} = (0,1+0,4)\frac{u_0}{k_2}$	$\Delta m_{\max} = (0,1+0,4)\frac{m_c}{k_3}$	$\Delta N_{\max}, \Delta u_{\max}$ - те же, что и для однострунного преобразователя		Определяется допускаемой погрешностью нелинейности
Погрешность нуля (при функциональной связи между параметрами)	$-\frac{1}{2}\frac{\delta l}{l} + \frac{1}{2}\frac{\delta N_0}{N_0}$	$\frac{1}{2}\frac{\delta E}{E} + \frac{1}{2}\frac{\delta S}{S} - \frac{\delta l}{\delta} - \frac{1}{2}\frac{\delta N_0}{u_0}$	$\frac{1}{2}\frac{\delta E}{E} + \frac{1}{2}\frac{\delta S}{S} - \frac{\delta l}{\delta} - \frac{1}{2}\frac{\delta u_0}{u_0}$	При случайных изменениях параметров суммируются дисперсии		Отсутствует при идентичности условий работы и характеристики каждой из струн
Погрешность чувствительности (при функциональной связи между параметрами)	$\frac{1}{2}\frac{\delta l}{l} - \frac{1}{2}\frac{\delta N_0}{N_0} + \frac{\delta k_1}{k_1} = \delta S_N$	$\frac{1}{2}\frac{\delta E}{E} - \frac{1}{2}\frac{\delta S}{S} - \frac{\delta l}{l} - \frac{1}{2}\frac{\delta u_0}{u_0} + \frac{\delta k_2}{k_2} = \delta S_u$	$\frac{1}{2}\frac{\delta E}{E} - \frac{1}{2}\frac{\delta S}{S} - \frac{\delta l}{l} - \frac{1}{2}\frac{\delta u_0}{u_0} + \frac{\delta k_3}{k_3} = \delta S_T$	$\delta S_N, \delta S_u$ - те же, что и для однострунного преобразователя		-
Погрешность нелинейности (при оптимальной аппроксимации секущей)	$\pm 0,0425 \frac{k_1 \Delta N_{\max}}{N_0}$	$\pm 0,0425 \frac{k_2 \Delta u_{\max}}{u_0}$	$\pm 0,0127 \frac{k_3 \Delta m_{\max}}{m_c}$	$\pm 0,31 \left(\frac{k_1 \Delta N_{\max}}{N_0}\right)^2$	$\pm 0,31 \left(\frac{k_2 \Delta u_{\max}}{u_0}\right)^2$	Для однострунных в среднем (0,5-2)%. Для дифференциальных (0,05-0,2)%

Точность измерительных приборов

В таблице приняты следующие условные обозначения:

k_1 ; k_2 ; k_3 - коэффициенты преобразования измеряемого параметра в натяжение, деформацию или массу струны соответственно; S_n ; S_u ; S_m - чувствительность; δl ; δN_0 ; δE ; δu_0 ; δS ; δk_1 ; δk_2 ; δk_3 - изменение параметров струн; δS_n ; δS_u ; δS_m - погрешность чувствительности; l ; N_0 ; E ; u_0 ; m ; S - параметры струн; n - коэффициент деления частотомера; N_0 и u_0 - сила начального натяжения струны и начальная упругая деформация струны соответственно.

Относительная максимальная погрешность дифференциального преобразователя в среднем в 10 раз меньше, чем в случае однострунного преобразователя. Основные преимущества дифференциальной схемы — большая чувствительность (в два раза), отсутствие аддитивной погрешности в идеальной схеме, значительно меньшая нелинейность. Для уменьшения погрешности чувствительности следует принимать те же меры, что и в однострунных преобразователях.

Применение специальных прецизионных сплавов для чувствительных элементов преобразователей позволило получить высокую временную стабильность их метрологических характеристик.

Стабильность выходного сигнала определяется стабильностью во времени параметров струны и постоянством фазовых сдвигов электронного усилителя.

Благодаря высокой добротности струны и использованию ряда конструктивных решений обеспечена требуемая стабильность частоты струнного автогенератора в течение весьма длительного времени, исчисляемого месяцами и даже годами.

При должном выборе конструктивных параметров струнного преобразователя перемещений его измерительное усилие при полном диапазоне измеряемых величин лежит в пределах 0,01—0,05 Н. Это обстоятельство является весьма ценным качеством струнного преобразователя, поскольку он может быть широко использован для контактного метода измерения геометрических размеров деталей малой жесткости.

Применительно к измерению перемещений, деформаций и размеров следует отметить ряд несомненных преимуществ цифровой информационно-измерительной системы со струнными преобразователями по сравнению с существующими устройствами аналогичного назначения:

Точность измерительных приборов

возможность преобразования сигнала в цифровую и аналоговую форму;

информация об измеряемой величине выдается в форме кода, что позволяет стыковать рассматриваемые устройства с ЦВМ и статанализаторами и на этой базе осуществлять автоматизацию управления технологическими процессами. Таким образом, цифровая информационно-измерительная система со струнными преобразователями является системой как пассивного, так и активного контроля;

цифровая индикация результатов измерения в натуральных единицах повышает производительность контрольных операций, объективность контроля и дает возможность с помощью цифropечатающих устройств документально регистрировать результаты измерения;

высокое быстродействие системы и возможность проверки метрологических характеристик устройства с использованием образцового электронно-счетного частотомера, являющегося в настоящее время широко распространенным и доступным прибором;

полученная в форме кода информация об измеряемой физической величине практически без искажений может передаваться на значительные расстояния, т. е. описываемое устройство можно с успехом применять для целей телеизмерения и телеуправления, обеспечивая при этом высокие метрологические показатели.

Следует отметить, что для повышения точности преобразования необходимо учитывать систематическую составляющую общей погрешности измерения и вводить соответствующую поправку в полученный результат. Однако такой метод повышения точности измерений требует значительных затрат времени и может быть рекомендован только для лабораторных исследований.

Структурная схема измерительного устройства с автоподстройкой суммарной частоты представлена на рис. 33. Схема состоит из исполнительного элемента 1, генератора линеаризующей струны 2, генератора измерительной струны 3, смесителя 4, электронно-счетного частотомера 5, фазового дискриминатора 6 и генератора стабильной частоты 7.

Измерительные устройства с автоподстройкой могут иметь весьма высокие метрологические показатели. Достаточно сказать, что суммарная погрешность за счет нелинейности статистической

Точность измерительных приборов

характеристики и ряда других факторов может быть снижена до значений 0,001—0,01%.

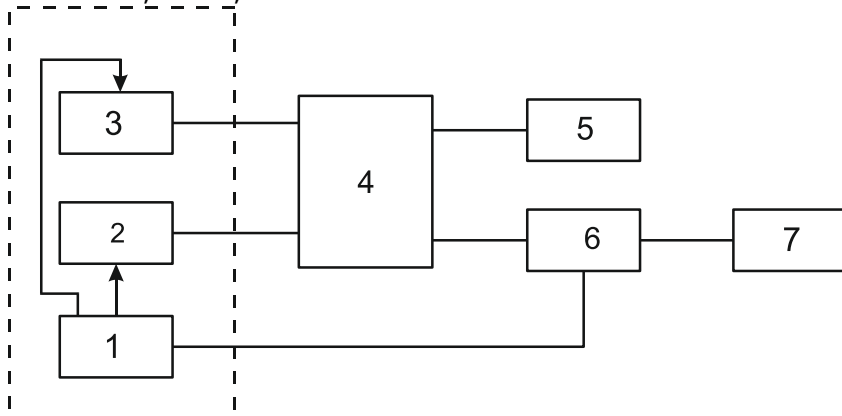


Рис. 33 Структурная схема измерительного устройства с автоподстройкой суммарной частоты

Таким образом, информационно-измерительная система со струнными преобразователями отличается рядом положительных моментов:

1. Универсальностью применения благодаря широкому диапазону измеряемых величин, что позволяет успешно их использовать для измерения линейных перемещений, температуры, силы, давления, угла, силы тока, напряжения и других физических величин и параметров технологических процессов. При этом различные физические величины можно измерять и контролировать в лаборатории и цеховых условиях, а также использовать эти устройства для поверки приборов, рассортировки изделий на группы при селективной сборке, а в сочетании со статанализатором, цифropечатающим устройством — для автоматических систем управления (АСУТП, АСУК) с применением ЦВМ.

2. Унификацией конструкции благодаря применению однотипных деталей и узлов.

Следует отметить, что с помощью такого унифицированного в конструктивном отношении преобразователя можно построить систему для измерения физических величин: силы, давления, температуры, силы тока или напряжения, геометрических параметров и др. Например, для реализации силоизмерительного устройства к свободному концу рычага 2 (см. рис. 1.22) прикладывают измеряемое усилие, измеряющее упругую деформацию

цию струны, а следовательно, и частоту ее колебаний. В конечном итоге для преобразования любой другой физической величины в частоту с помощью унифицированного струнного преобразователя необходимо эту физическую величину трансформировать в изменение упругой деформации струны.

12.4. Преимущества УИИС МО технологических процессов

С применением этой системы:

1) существенно сокращается номенклатура используемых преобразователей, что позволяет объединить усилия предприятий, занимающихся изготовлением различных преобразователей для измерения одних и тех же параметров;

2) увеличивается производительность контрольных операций и достоверность получаемой информации, что позволяет сократить численность сотрудников ОТК, привлечь работников с более низкой квалификацией с одновременным повышением качества выпускаемой продукции;

3) унифицируется выходной сигнал и тем самым сокращается номенклатура различных типов согласующих преобразователей «Измерительное устройство—ЦВМ» до нескольких или даже до одного типа «частота — код» и появляется возможность проектирования ЦВМ с унифицированным входным сигналом.

Метрологическое обеспечение производственных процессов унифицированной по принципу действия и входному сигналу информационно-измерительной системой позволит устранить произвольное применение информационно-измерительных преобразователей, повысить эффективность информационно-измерительных систем в народном хозяйстве страны.

На кафедре «Метрология электронной техники» МИЭМ разработана одна УИИС для контроля различных физических величин и параметров технологических процессов. В ней можно использовать унифицированный струнный информационно-измерительный преобразователь, позволяющий контролировать пять—восемь физических величин, стандартизованный частотомер, стандартизованные цифropечатающие устройства, статанализатор или ЦВМ.

Практическое применение система МИЭМ получила на ряде предприятий различных отраслей промышленности.

Возможно также создание и других УИИС МО технологиче-

Точность измерительных приборов

ских процессов, использующих информационно-измерительные преобразователи других типов.

Создание единой УИИС МО технологических процессов, стандартизация условий применения такой системы позволят получить значительный экономический эффект и будут строго регламентировать выбор ИИП, ограничив число типов до трех—пяти, применяемых в каждой отрасли.

13. НАДЕЖНОСТЬ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Общие сведения

Надежность — свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации может включать в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость в отдельности или определенное сочетание этих свойств как для объекта, так и для его частей.

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Ремонтпригодность — свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения его отказов, повреждений и устранению их последствий путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

Сохраняемость — свойство объекта непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в течение и после хранения и транспортирования.

Для определения количественных показателей надежности проводят специальные виды испытаний. Порядок их проведения и обработки статистических данных, полученных в результате испытаний, регламентируется государственными стандартами, такими, как ГОСТ 18049—72 «Надежность в технике. Испытания ограниченной продолжительности с заменой отказавших изделий»; ГОСТ 17509—72 «Надежность изделий машиностроения. Система сбора и обработки информации. Методы определения точечных оценок показателей надежности по результатам наблюдений» и др.

Показатели надежности можно оценивать на основании наблюдений, полученных в реальных условиях эксплуатации средств измерений. Кроме того, в процессе наблюдений доста-

Точность измерительных приборов

точно полно изучают их эксплуатационные свойства.

Изучение эксплуатационных свойств включает в себя:

- выявление конструктивных недостатков и дефектов изготовления средств измерений в целом и отдельных их узлов;
- информацию приборостроительных предприятий о выявленных недостатках с целью улучшения качества средств измерений;
- изучение надежности средств измерений в зависимости от условий эксплуатации с целью установления оптимальных межпроверочных интервалов;
- накопление данных, необходимых для повышения уровня государственных испытаний средств измерений;
- анализ причин отказов;
- определение ремонтпригодности измерительных приборов;
- определение необходимого количества и номенклатуры поставляемых запасных частей;
- определение удобства работы с прибором в условиях его эксплуатации.

Основным критерием, определяющим надежность прибора, является качество исполнения монтажной схемы и составляющих ее элементов.

Неисправность прибора, как правило, вызывается неисправностью того или иного элемента схемы— электронной лампы, конденсатора, трансформатора питания и других элементов, требующих замены или ремонта. К показателям надежности относятся также продолжительность работы прибора между отказами и количество отказов за определенный период времени.

Необходимо анализировать отказы, различать отказ в работе прибора, влекущий за собой невозможность его использования, в неисправность, не связанную с прекращением выполнения прибором его функции (отключение или перегорание индикаторной лампочки, повреждение лакокрасочных покрытий, трещины стекла индикаторного прибора и т. д.).

Время наработки на отказ измерительного прибора определяется продолжительностью его исправной работы между двумя смежными отказами. Нарботка на отказ может быть найдена из

$$\text{соотношения } T_{\text{ср}} = \frac{t}{f},$$

где t — продолжительность работы прибора; f — число отказов за время его работы.

Точность измерительных приборов

Наработка на отказ измерительного прибора зависит от условий эксплуатации, качества ремонта, сложности самого прибора и может составлять от десятков до тысяч часов. Особое место в вопросе надежности измерительной аппаратуры должно быть отведено качеству и надежности ремонта, производимого после появления отказа.

Отремонтированная измерительная техника, как и новая, имеет гарантийный срок службы.

Показателем надежности может служить вероятность безотказной работы, характеризующая экспоненциальной зависимо-

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T_{cp}}}$$

где T_{cp} — наработка на отказ.

При ремонте аппаратуры очень важно определить ее ремонтпригодность, характеризующую величину математического ожидания времени восстановления работоспособности прибора. Малое значение этого показателя свидетельствует о хорошей ремонтпригодности прибора.

Независимо от характера неисправности, вида отказа (внезапного или постепенного, частичного или полного) работоспособность прибора должна быть восстановлена заменой (при невозможности ремонта) дефектных элементов, узлов, участков монтажа и т. д. исправными, имеющими достаточную степень надежности. При этом необходимо обеспечить высококачественное проведение ремонтных работ, а это требует правильной замены отказавших элементов, учета их характеристик, производства качественной пайки монтажа для получения надежного контакта, а также правильного проведения регулировочных работ. Надежность и долговечность отремонтированного прибора зависят от качества деталей, установленных вместо неисправных, и качества исполнения ремонта;

Своевременное проведение профилактических ремонтных работ, устранение или сведение к минимуму внешних воздействий, вызывающих преждевременные отказы приборов (большие колебания сетевого напряжения, вибрации, повышенная влажность и пр.) — все эти вопросы тесно связаны с надежностью работы и качеством ремонта аппаратуры.

Эксплуатационные свойства средств измерений изучают путем: систематического наблюдения за средствами измерения в эксплуатации;

Точность измерительных приборов

проведения эксплуатационных испытаний;
сбора данных об эксплуатационных свойствах от предприятий, организаций, применяющих средства измерений, и органов метрологической службы предприятий и обработки их.

На предприятиях и в организациях должны быть назначены ответственные лица (из сотрудников поверочной группы) за изучение эксплуатационных свойств средств измерений. Их изучают:

- в течение одного года, если гарантийный срок работы средств измерений менее года;
- в течение гарантийного срока, если гарантийный срок работы средств измерений более года.

Изучать должны возможно большее количество средств измерений каждого типа, чтобы сделать объективный вывод по определенному типу приборов.

Изучая эксплуатационные свойства средств измерений, их группируют по типам, выпускаемым заводами-изготовителями, годам выпуска и условиям эксплуатации. При этом отбирают экземпляры средств измерений не более двухлетней давности изготовления, полностью соответствующие требованиям стандартов и технических условий, с неповрежденными заводскими или действующими поверительными клеймами (свидетельствами).

Условия эксплуатации средств измерений должны соответствовать инструкции по эксплуатации. Монтаж или установку средства измерения следует проводить под наблюдением работника ЛГН или ответственного лица за проведение работ по изучению эксплуатационных свойств приборов.

В процессе изучения эксплуатационных свойств на каждый экземпляр средства измерений заводят карту, в которую заносят:

- общие сведения о приборе;
- сведения об условиях работы (температуре, средней относительной влажности, вибрации, механических воздействиях и других, факторах);
- сведения о режиме работы: включено ли средство измерения постоянно в течение определенного времени или работает в режиме кратковременных включений; постоянная или переменная нагрузка и общая продолжительность работы.

Карту подписывает лицо, ответственное за изучение эксплуатационных свойств средств измерений.

Полученные данные вносят в протокол, в котором отражаются:

Точность измерительных приборов

- сведения о времени изучения эксплуатационных свойств средств-1 измерений;
- сведения о среднем времени наработки на отказ;
- сведения о результатах проверок;
- сведения о наиболее характерных неисправностях;
- данные о ремонте (характер ремонта, причины, вызывающие неисправность);
- данные о конструктивных и эксплуатационных особенностях и недостатках;
- общая характеристика эксплуатационных свойств и предложения по дальнейшему усовершенствованию средств измерения или снятия его с производства.

В случае безвозвратного выхода из строя средства измерения в протоколе делают соответствующую запись с указанием причины неисправности, и прибор снимают с изучения.

14. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Самым существенным средством поддержания единства измерений в стране является воспроизведение и хранение единиц измерения с помощью эталонов.

Эталон — средство измерения (или комплекс средств измерений), обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы с целью передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений, выполненное по особой спецификации и официально утвержденное в установленном порядке в качестве эталона. Эталон воспроизводится с наивысшей метрологической точностью, достижимой при данном состоянии науки и техники.

Поверочная схема — утвержденный документ, устанавливающий средства, методы и точность передачи размера единицы от эталона или исходного образцового средства измерений рабочим средствам измерений (рис. 34). Она состоит из: государственного эталона /; эталона-копии 3; эталона-свидетеля 4; рабочего эталона 5; образцовых средств измерений соответствующих разрядов 6, 7 и 8; образцовых средств измерений, заимствованных из других поверочных схем 9; рабочих средств измерений 10. Кроме того в нее входит метод передачи размера единиц 2.

Эталоны подразделяют на первичные, вторичные, государственные, рабочие и другие.

Государственный эталон — первичный или специальный эталон, официально утвержденный в качестве исходного для страны.

Первичный эталон — эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же единицы) точностью.

Вторичный эталон — эталон, значение которого устанавливают по первичному эталону.

Рабочий эталон — эталон, применяемый для передачи размера единицы образцовым средствам измерений высшей точности, и в отдельных случаях — наиболее точным рабочим средствам измерений.

Эталонная установка — измерительная установка, входящая в комплекс средств измерений, утвержденный в качестве эталона.

Рабочее средство измерений — средство измерений, применяемое для измерений, не связанных с передачей размера еди-

НИЦ.

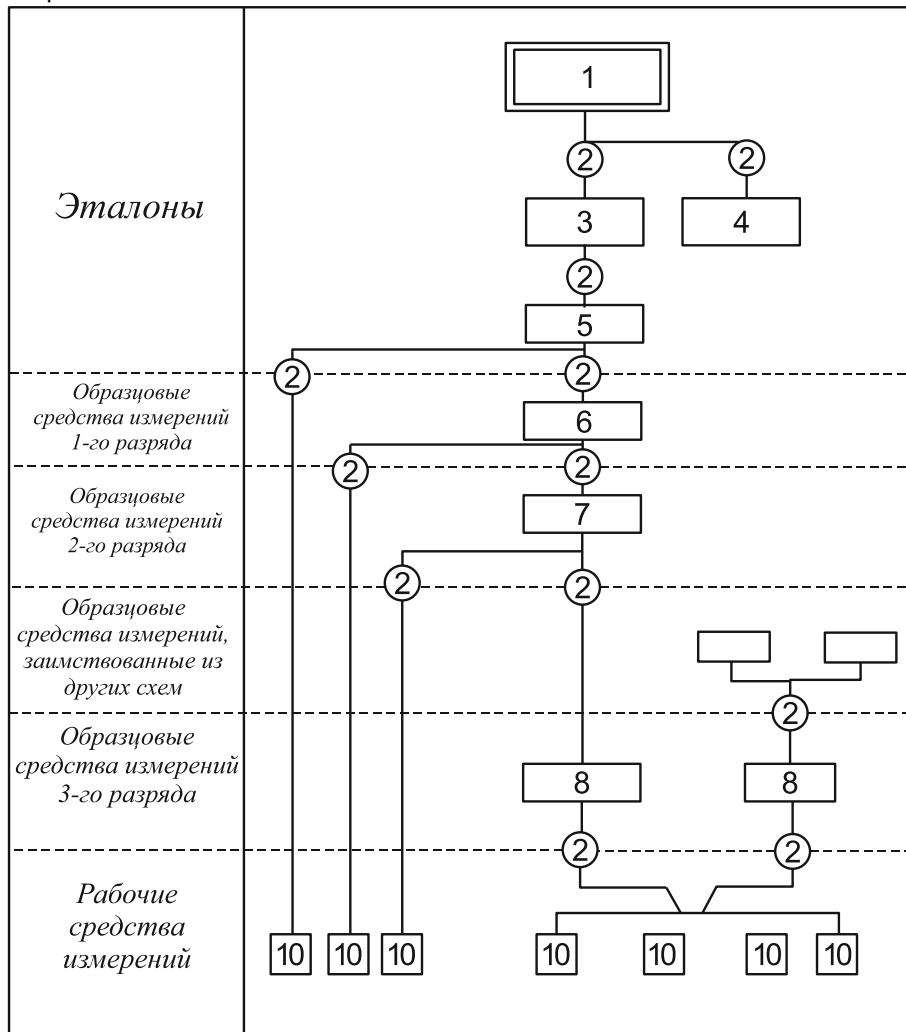


Рис. 34 Поверочная схема

Образцовое вещество — образцовая мера в виде вещества с известными свойствами, воспроизводимыми при соблюдении условий приготовления, указанных в утвержденной спецификации. Например, чистая вода, чистые газы (водород, кислород), чистые металлы (цинк, серебро, золото, платина).

Стандартным образцом называется мера для воспроизведе-

Точность измерительных приборов

ния единиц величин, характеризующих свойства или состав веществ и материалов.

Разряд образцовых средств измерений — категория образцовых средств измерений, отнесенных к одной и той же ступени поверочной схемы. Разряды образцовых мер нумеруются 1-й, 2-й и т. д.

Для хранения единиц, воспроизводимых с помощью государственных первичных эталонов, и для дальнейшей передачи их размера всем применяемым в стране средствам измерений служат вторичные эталоны и образцовые средства измерений. Их соподчинение и методы передачи устанавливаются в поверочных схемах.

Количество уже существующих вторичных эталонов составляет несколько сотен, и здесь нет возможности перечислить их. Это же относится и к образцовым средствам измерений, исчисляемым многими десятками тысяч.

Основные направления деятельности метрологических служб, обеспечивающих единство измерений и высокий уровень техники следующие.

Создание и непрерывное совершенствование государственной системы эталонов единиц физических величин.

Для выполнения этих работ проводят в большом объеме теоретические и экспериментальные исследования, определяют и уточняют физические константы для создания системы эталонов, проводят международные сличения эталонов и др.

Размеры единиц физических величин передаются на уровне верхних звеньев поверочных схем (эталон).

В метрологических научно-исследовательских институтах осуществляют государственный надзор за стандартами и измерительной техникой высших разрядов и согласно поверочной схеме поверяют и рабочие средства измерений, применяемые в торговле и при взаимных расчетах, для охраны здоровья трудящихся и обеспечения безопасности труда. Рабочие средства измерений поверяют в органах ведомственных метрологических служб, а в случае, если у них нет соответствующих условий — в лабораториях государственного надзора за стандартами и измерительной техникой.

Другим направлением обеспечения единства измерений и высокой техники средств измерений в стране являются государственные испытания измерительных средств.

15. ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ЭТАЛОНОВ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЙ

Государственная система эталонов единиц измерений является основой единства и верности измерений физических величин, разработки методов и средств измерений во всех областях науки и техники.

В метрологических институтах разрабатывают, воспроизводят и хранят государственные эталоны основных и многих производных единиц измерений.

Единицей измерения длины является метр, равный 1650763,73 длины волны излучения в вакууме, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86. Это определение метра было принято XI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 г. Созданный во ВНИИМ комплекс аппаратуры для воспроизведения метра в длинах волн излучения криптона Госстандарт СССР в январе 1968 г. официально утвердил в качестве государственного эталона метра.

Эталон единицы массы — килограмм представлен массой международного прототипа килограмма, который имеет форму цилиндра $\varnothing 39$ мм, $h = 39$ мм. Платино-иридиевый эталон килограмма сохраняет свою массу достаточно стабильно: за период с 1889 по 1948 г. масса эталона изменилась на $1,7 \cdot 10^{-8}$ кг. Погрешность измерения килограмма при сличениях составляет $\pm 2 \cdot 10^{-9}$ кг.

Единицей измерения времени является секунда, которая определяется как промежуток времени, в течение которого совершается 9192631770 колебаний, соответствующих переходу между сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Государственный эталон единицы времени (и частоты) состоит из группы атомных генераторов, кварцевых часов и устройств для сличения эталонных частот. Уже осуществлен практический переход на равномерную атомную шкалу времени. Эта шкала опирается на атомные реперы частоты, в состав которых входит созданный генератор на атомном водороде; воспроизводимость частоты этого генератора составляет $\pm (1-5) \cdot 10^{-12}$.

Повышение точности эталонов времени и частоты имеет определяющее значение для решения основных проблем космонавтики, навигации, многих задач астрономии и других, наук.

Точность измерительных приборов

Эталон единицы силы тока — ампер — сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ И на каждый метр длины.

Ампер воспроизводится по электродинамическому взаимодействию токов в токовых весах с погрешностью $\pm 0,001$ %.

Повышение точности эталонов электрических величин связано со снижением погрешностей определения гиромангнитного отношения протона с целью измерения в дальнейшем электрических величин через это отношение. Перспективным направлением совершенствования измерений электрических величин являются также работы по созданию эталонного расчетного конденсатора для воспроизведения единицы емкости — фарады.

Единицей термодинамической температуры является кельвин — $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды. Однако для практических измерений температуры предусмотрено применение

В Международной практической температурной шкале 1968 г. различают международную практическую температуру Кельвина, символ T_{68} , и международную практическую температуру Цельсия, символ t_{68} . Соотношение между T_{68} и t_{68} :

$$t_{68} = T_{68} - 273,15 \text{ К.}$$

Эта температурная шкала основана на значениях температур, присвоенных определенному числу воспроизводимых состояний равновесия и на специфицированных аттестованных интерполяционных приборах.

Погрешность воспроизведения Международной практической температурной шкалы эталонным платиновым термометром сопротивления составляет: в точке кипения кислорода — $182,97 \pm 0,003$ °C; в тройной точке воды $+0,01 \pm 0,0002$ °C; в точке кипения воды $100 \pm 0,0005$ °C; в точке затвердевания цинка $419,505 \pm 0,0003$ °C.

Погрешность определения термодинамической температуры реперных точек с помощью газового термометра следующая: в точке кипения гелия $4,2 \pm 0,005$ К; в точке кипения кислорода $90 \pm 0,01$ К; в точке затвердевания золота $1336 \pm 0,2$ К.

Эталон единицы силы света — кандела — сила света, испускаемого с площади $1/600000$ м² сечения полного излучателя, в перпендикулярном к этому сечению направлении при темпе-

Точность измерительных приборов

ратуре излучателя, равной температуре затвердевания платины при давлении 101325 Па.

Кандела наиболее точно воспроизводится при помощи эталонного устройства — полного излучателя, называемого иногда абсолютно черным телом. Излучатель изготовлен из окиси тория в форме цилиндрической трубы, открытой с одной стороны, и помещен в расплавленную платину. Этот эталон воспроизводит также единицы светового потока и освещенности. Средняя квадратическая погрешность воспроизведения канделы не превышает $2 \cdot 10^{-3}$. Расхождения в результатах измерений канделы различными метрологическими лабораториями такие, что воспроизведению единицы во всех странах приписывается погрешность $\pm 0,5\%$.

В настоящее время такая погрешность измерения световых величин удовлетворяет запросы науки и техники. Однако определение мощности излучения в широком диапазоне спектра от ультрафиолетового до инфракрасного участков длин волн потребует дальнейшего повышения точности измерения световых величин.

В качестве дополнительной единицы плоского угла в СИ принят радиан — угол между двумя радиусами круга, вырезающий на его поверхности дугу, длина которой равна радиусу.

Государственный первичный эталон единицы плоского угла состоит из 36-гранной призмы; эталонной угломерной автоколлимационной установки, в которую входят фотоэлектрические автоколлиматоры с электронным цифровым отсчетным устройством, позволяющим выполнять измерения в пределах от $-6''$ до $+6''$, и система для установки и поворота многогранной призмы.

Погрешность воспроизведения единицы плоского угла оценивается средним квадратическим отклонением результата измерений, не превышающим $0,02''$ и неисключенной систематической погрешностью, не превышающей $0,02''$.

В метрологических институтах страны овеществляют и производные единицы, эталоны которых также непрерывно совершенствуются. Это эталоны в области механики (эталон единицы давления, силы), электрических измерений (эталон единицы индуктивности, емкости, ома, вольта), в области ионизирующих излучений (эталон единицы активности, плотности нейтронного потока, экспозиционной дозы, мощности дозы рентгеновского и гамма излучений) и в ряде других областей.

Первичным эталоном единицы давления служит группа из пяти грузопоршневых манометров с пределами измерения от $1 \cdot 10^5$ до $60 \cdot 10^5$ Па. Рабочими эталоном являются наборы гру-

Точность измерительных приборов

зопоршневых манометров, обеспечивающих измерения в пределах от $0,25 \cdot 10^5$ до $600 \cdot 10^5$ Па с погрешностью $\pm 2 \cdot 10^{-3}\%$.

Единица температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) воспроизводится на эталонных интерференционных дилатометрах на основе использования эталонов единиц длины и температуры и передается образцовой мере 1-го разряда путем абсолютного совместного измерения удлинения меры и изменения температуры, вызвавшего это удлинение, и последующего вычисления значений ТКЛР испытываемой меры.

Комплекс аппаратуры, представляющий государственный первичный эталон единицы ТКЛР, состоит из:

интерференционного дилатометра ДИН-3 с термокриостатом для абсолютного измерения ТКЛР в интервале температур 90—300 К;

интерференционного дилатометра ДИ-2 с печью-термостатом для абсолютного измерения ТКЛР в интервале температур 300—1100 К.

Конструкция термокриостата и печи-термостата обеспечивает получение любых промежуточных температур и поддержание их на заданном уровне длительное время в пределах от $\pm 0,005$ до $\pm 0,05$ К соответственно. ТКЛР измеряют в стационарных температурных условиях.

Единица ТКЛР воспроизводится в диапазоне от $0,1 \cdot 10^{-6}$ до $25 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} . Среднее квадратическое отклонение результата измерения среднего ТКЛР материалов с коэффициентами от $0,1 \cdot 10^{-6}$ до $25 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} в стоградусном интервале температур от $3 \cdot 10^{-9}$ K^{-1} до $10,7 \cdot 10^{-8}$ K^{-1} соответственно.

Созданный государственный первичный эталон единицы ТКЛР позволит удовлетворить высокие требования науки и промышленности, которые предъявляются в настоящее время к точности измерения ТКЛР различных материалов.

Первичный эталон единицы давления и механического напряжения в системе СИ паскаль (Па) воспроизводит эту единицу и передает ее размер вторичным эталонам со средней квадратической погрешностью $(6—8) \cdot 10^{-4}\%$. Пределы измерения $(6—60) \cdot 10^5$ Па.

Под паскалем понимается давление, вызванное силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м².

Для области низкого давления от 10 до $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. создан набор образцовых ком-прессионных манометров, по-

Точность измерительных приборов

стоянные которых определяются линейными и объемными измерениями. Погрешность в зависимости от измеряемой величины составляет от $\pm(1-5)\%$.

В области измерения силы основной является установка с эталонным набором мер для воспроизведения силы от $2 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^5$ Н с погрешностью $\pm 0,02\%$. С помощью установки размер единицы передается переносным динамометром 1-го разряда с погрешностью $\pm 0,1\%$.

В области ареометрии единица плотности воспроизводится весовым методом с помощью эталонного набора денсиметров. Размер единицы передается образцовым денсиметрам, сахариметрам и спиртомерам с погрешностью для денсиметров от $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ до $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ г/см³.

Первичным эталоном единицы вязкости является вязкость дистиллированной воды при 20°C, равная $1,0068 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Образцовым вискозиметрам размер единицы передают с предельной погрешностью $\pm 0,2\%$.

Государственный первичный эталон единицы плотности жидкости осуществлен в виде комплекса средств измерений, состоящего из наборов стеклянных пикнометров и поплавков, установки для гидростатического взвешивания, установок для заполнения и аттестации пикнометров и аппаратуры для определения плотности воздуха. Диапазон измерений составляет 650—2000 кг/м³ при среднем квадратическом отклонении результата $1,2 \cdot 10^{-4}$.

Эталонами производных электрических единиц являются эталоны ома, вольта, генри и фарады.

Первичный эталон вольта, состоящий из 20 насыщенных нормальных элементов, имеет стабильность 10^{-6} В, абсолютное значение вольта воспроизводится с помощью токовых весов с погрешностью 10^{-5} В.

Представляет практический интерес использование эффекта Джозефсона в сверхпроводниках для создания первичного эталона э.д.с. Подобный эталон может иметь высокую точность, соответствующую погрешности измерения частоты 10^{-7} — $10^{-8}\%$, так как воспроизводимую э.д.с. определяют через фундаментальные

постоянные по формуле
$$U = \frac{h\omega}{2e}.$$

где h — приведенная постоянная Планка; e — заряд электрона.

Для нестационарного эффекта Джозефсона напряже-

Точность измерительных приборов

ние на переходе, помещенном в жидкий гелий, возрастает дискретными ступеньками. Напряжение на n -й ступеньке находят по формуле $U = \frac{nh\omega}{2e}$

Поскольку частоту можно измерить с погрешностью до $10^{-100}\%$, то теоретически можно с той же погрешностью определить напряжение на переходе. Переходы Джозефсона могут быть использованы в целях получения точности в высших звеньях поверочной схемы мер э.д.с. и напряжения.

От первичного эталона размер единицы передают рабочим эталонам с погрешностью, не превышающей $\pm 1 \cdot 10^{-4}\%$.

Единица индуктивности воспроизводится группой катушек индуктивности номинального значения от 0,01 до 0,03 Г. Единица емкости воспроизводится набором конденсаторов емкостью до 10^{-7} Ф. Погрешность воспроизведения единиц индуктивности и емкости составляет $\pm 0,002\%$.

Размеры единиц образцовым мерам передают через рабочие эталоны при посредстве емкостных, индуктивно-емкостных и иных других типов мостов. Диапазон образцовых мер 1-го разряда: индуктивности — от 10^{-7} до 10 Г и емкости — от 10^{-15} до 10^{-5} Ф. Погрешность передачи от $\pm 0,01$ до $\pm 0,5\%$ в зависимости от измеряемой величины.

Первичным эталоном для области магнитных измерений является эталон единицы напряженности магнитного поля, воспроизводимой с помощью катушек по Гельмгольцу, которые в сочетании с измерительными катушками служат также эталонами единицы магнитного потока. Погрешность эталонов единиц напряженности магнитного поля и магнитного потока в зависимости от измеряемой величины составляет $\pm(0,01—0,2)\%$.

В области акустических измерений единица звукового давления воспроизводится в диапазоне частот 5—1000 кГц методом гидропресса в диапазоне: 5—100 Гц, набором звукомерных дисков в диапазоне 20—30 кГц, обратимыми электроакустическими преобразователями в диапазоне 500 Гц—300 кГц, набором акустических радиометров в диапазоне 100—1000 кГц.

Через рабочие эталоны {турмалиновые микрофоны, гидрофоны) единицу звукового давления передают образцовым приборам 1-го разряда (микрофонам, приборам «искусственное ухо», гидрофонам) с погрешностью, не превышающей $\pm 3\%$.

Для испытаний виброизмерительной аппаратуры в диапазоне частот 10—10000 Гц во ВНИИМ созданы высокоточные

Точность измерительных приборов

измерительные установки. В них имеются устройства для воспроизведения механических колебаний и измерения их параметров (амплитуды и частоты). Установки позволяют поверять виброизмерительные приборы методом непосредственного сличения с датчиком вибростенда, периодически градуируемыми и поверяемыми с погрешностью $\pm 3\%$. Коэффициент нелинейных искажений различных стендов от 0,2 до 8%.

В области ионизирующих излучений имеются эталоны рентгена, единицы активности радия и плотности нейтронного потока. Рентген воспроизводят с помощью эталонных ионизационных камер для излучений с энергией квантов 5—20, 10—60, 60—250 и 250—3000 кэВ. Размер единицы передают на образцовые рентгенометры с погрешностью $\pm(2-7)\%$ и на образцовые гамма-измерители с погрешностью до $\pm 15\%$.

Единицу активности воспроизводят по ионизационному или тепловому действию излучения и ее размеры передают образцовым измерителям 1-го разряда (α -, β -, γ - излучателям) с погрешностью $\pm(1,5-5)\%$.

Эталонами обеспечены и многие другие области измерений, в частности измерения на высоких и сверхвысоких частотах, определение шероховатости поверхности, измерение твердости, фотометрия, определение состава вещества.

Важнейшей задачей метрологических институтов является разработка точных методов и средств измерения различных физических величин в нужных для практического использования диапазонах— от самых малых до самых больших значений, в том числе различных характеристик процессов во всем диапазоне используемых частот. Основной целью этих разработок является привязка значений измеряемых величин к существующим эталонам, что служит единственной надежной гарантией достоверности всех практически осуществляемых измерений.

16. ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Совершенствование парка средств измерений обеспечивается путем проведения государственных испытаний всех типов средств измерений, разработанных отечественными организациями и предприятиями, а также ввозимых из-за границы.

Проводя государственные испытания, в первую очередь определяют, соответствует ли новый тип средства измерений по своим характеристикам потребностям народного хозяйства, отвечает ли он современным достижениям науки и техники и находится ли на уровне лучших зарубежных образцов. При государственных испытаниях также определяют, технологичен ли новый измерительный прибор и можно ли быть уверенным в стабильности его характеристик в процессе эксплуатации. Наконец, определяют порядок и формы метрологического обслуживания данного типа средств измерений, устанавливают межповерочный интервал и утверждают нормативно-технические документы на методы и средства его поверки. Успешно выдержавшие государственные приемочные испытания средства измерений заносят в Государственный реестр и допускают их к выпуску и применению.

В процессе серийного производства средства измерений подвергают периодическим государственным контрольным испытаниям.

После доработки и устранения всех выявленных недостатков образцы средств измерений данного типа должны быть вновь представлены на приемочные испытания в соответствии с техническими требованиями.

Метрологический надзор за состоянием и правильностью применения средств измерения на предприятиях и в организациях всех отраслей народного хозяйства осуществляют лаборатории государственного надзора. Госнадзор обеспечивает постоянную готовность парка средств измерений, находящихся в применении в народном хозяйстве страны, к выполнению измерений и исключению возможности эксплуатации средств измерений, метрологические характеристики которых не отвечают установленным требованиям. Госнадзор осуществляют путем проведения поверки средств измерений, метрологической ревизии и метрологической экспертизы.

Органы ведомственных метрологических служб под методическим руководством лабораторий государственного надзора за стандартами и измерительной техникой (ЛГН) также контро-

Точность измерительных приборов

лируют состояние и правильность применения средств измерений на подведомственных им предприятиях.

Все средства измерений подлежат обязательной государственной или ведомственной поверке. Поверку подразделяют на первичную, периодическую, внеочередную и инспекционную.

Первичную поверку должны проводить при выпуске средств измерений в обращение из производства и ремонта.

Периодическую поверку следует проводить при эксплуатации и хранении средств измерений через межповерочные интервалы, установленные с расчетом обеспечения исправности средств измерений на период между поверками.

Внеочередную поверку проводят при эксплуатации (хранении) средств измерений вне зависимости от сроков периодической поверки, а также в случаях, предусмотренных нормативными документами.

Инспекционную поверку осуществляют с целью выявления исправности средств измерений, выпускаемых из производства или ремонта и находящихся в обращении и при проведении метрологической ревизии на предприятиях, складах, базах снабжения и в торговых организациях.

Обязательной государственной поверке подлежат средства измерений, применяемые в органах государственной и ведомственной метрологических служб; в качестве образцовых средств измерений при градуировке и поверке средств измерений, выпускаемых в обращение приборостроительными предприятиями, а также прибороремонтными участками других предприятий, выполняющими ремонт средств измерений для сторонних организаций и в других случаях.

Инспекционной поверке подвергают средства измерений вне зависимости от их назначения.

Поверку средств измерений следует проводить в соответствии с требованиями государственных стандартов и методик на методы и средства поверки.

Ревизия средств измерений — это проверка состояния средств измерений и выполнения правил их поверки и применения, проводимая органом государственной метрологической службы.

Метрологическую ревизию проводят с целью определения соответствия средств измерений и применяемых методик измерений современным требованиям народного хозяйства и уровню метрологического обеспечения производства, а также с целью

Точность измерительных приборов

проверки готовности средств измерений к выполнению измерений с нормированной точностью в целях совершенствования парка средств измерений и повышения эффективности метрологического обеспечения производства.

Исправность средств измерений, а также достоверность результатов поверки, проведенной органами ведомственных метрологических служб, следует контролировать в процессе инспекционной поверки.

Органы государственной метрологической службы при установлении в результате проведения метрологической ревизии неудовлетворительного качества изготовленных или отремонтированных средств измерений, неудовлетворительного состояния средств измерений, находящихся в обращении, низкого качества их поверки, несоответствия выполняемых работ по поверке регистрационному удостоверению или нарушения условий, подлежащих соблюдению при проведении поверки, имеют право запрещать выпуск в обращение изготовленных или отремонтированных средств измерений, не отвечающих требованиям стандартов и технических условий; назначить сплошную одновременную поверку всех средств измерений предприятий, находящихся в эксплуатации, или определенной их номенклатуры в органах государственной метрологической службы, а также другие административные меры.

При обнаружении на предприятии существенных недостатков в состоянии парка средств измерений (в том числе необеспеченность средствами измерений технологических процессов, несоответствие средств измерений требованиям контроля технологических процессов и качества продукции, неисправность средств измерений) должно быть установлено и отражено в акте ревизии влияние этих недостатков на ход производственных процессов и качество продукции.

Метрологическую экспертизу проводят с целью экспертной оценки состояния средств измерений и правильности их поверки и применения. Ее проводят при возникновении спорных вопросов по метрологическим свойствам, методам и средствам поверки, неисправности средств измерений и пригодности их к применению.

17. СТАНДАРТИЗАЦИЯ МЕТОДИК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Одним из направлений метрологической деятельности является стандартизация методик выполнения измерений. Это обусловлено тем, что погрешности результатов измерений определяются не только погрешностью применяемых средств измерений, но применяемыми методами измерений, внешними условиями, в которых измерения выполняются, способами обработки результатов измерений и др. Часто оказывается, что погрешности средств измерений составляют весьма малую долю погрешности результата измерений. Различие между погрешностью результата измерений и погрешностью применяемых средств измерений характеризуется рядом обстоятельств.

Во-первых, сейчас в производственных условиях в массовом масштабе выполняют очень сложные измерения, основанные на применении сложных физических условий. Еще недавно такие измерения не проводили вообще либо выполняли в исследовательских лабораториях, где погрешности измерений специально следили высококвалифицированные специалисты. Причем в производственных условиях все чаще стали измерять «сверхмалые» и «сверхбольшие» значения физических величин, техника измерения которых всегда сложнее измерения «средних» значений и поэтому приводит к большим методическим и аппаратурным погрешностям.

Естественно, что выполнять подобные исследования погрешностей при измерениях, выполняемых в массовых масштабах, крайне затруднительно и экономически невыгодно.

Во-вторых, в современном производстве очень широко используют результаты измерений, полученные с помощью сложных измерительных систем, включающих самые разнообразные средства измерений, или совместно используют результаты измерений, выполняемые разными средствами измерений, причем в различных условиях, в разное время и в разных местах.

В-третьих, современные массовые измерения, и особенно измерения в процессе эксплуатации различных видов техники, часто проводятся в тяжелых внешних условиях, когда резко изменяются температура окружающей среды, влажность, напряжение источников питания, электрическое и магнитное поле, вибрация и ряд других факторов, что приводит к возникновению ряда допол-

Точность измерительных приборов

нительных погрешностей.

Все упомянутое выше приводит к тому, что погрешность результатов измерений часто в несколько раз превышает погрешность применяемых средств измерений. В то же время вся сложная и дорогая измерительная техника нужна только для получения результатов измерения, к точности которых предъявляются вполне определенные требования или точностные характеристики которых должны быть определены в процессе выполнения измерений.

До последнего времени в большинстве случаев за погрешность результатов измерений принимали погрешность применяемых средств измерений, что приводило к большим экономическим потерям, а в ряде случаев и к невозможности решения технических задач. В других случаях задачи по оценке погрешности результатов измерений решали одновременно с решением основной технической задачи без участия специалистов-метрологов, что приводило к задержке решения основной задачи, затягиванию сроков ее исполнения и не всегда к оптимальным способам ее решения. Единственным способом высокоэффективного решения комплекса задач по правильной оценке погрешностей результатов измерений является широкое применение хорошо разработанных методов стандартизации, в данном случае — стандартизация методик выполнения измерений.

18. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА ПРЕДПРИЯТИЙ

Основным направлением в деятельности метрологической службы предприятий является управление качеством. Поэтому в задачу метрологической службы предприятия входит организация и проведение работ (совместно с отделом технического контроля и другими техническими службами предприятия, учреждения, организации) по выявлению причин брака продукции, некачественного выполнения научно-исследовательских работ и других потерь, являющихся следствием применения несовершенных и неверных средств измерений, а также по разработке и проведению мероприятий по предупреждению и устранению этих потерь,

Метрологические органы предприятий, являясь важнейшим звеном метрологической службы, призваны обеспечить необходимую и достаточно достоверную измерительную информацию при проектировании, испытании и контроле качества выпускаемой продукции. В связи с этим основными задачами метрологической службы являются следующие.

1. Обеспечение надлежащего состояния мер и измерительных приборов, применяемых на предприятии.

2. Систематическое изучение эксплуатационных качеств измерительной аппаратуры, установление надежности ее работы и оптимальных сроков периодической поверки.

3. Проведение надзора за состоянием и правильным применением измерительной и испытательной техники, за соблюдением установленных методов измерения и испытаний во всех подразделениях предприятия.

4. Активное участие в вопросах выбора и назначения средств измерений, активная политика в области автоматизации измерений и разработки, испытаний и внедрения новой прогрессивной измерительной техники, связанной с дальнейшим подъемом технического уровня предприятия и повышением качества выпускаемой продукции.

19. ТРЕБОВАНИЯ К ВНЕШНИМ УСЛОВИЯМ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ

Под соблюдением требований к внешним условиям понимается совокупность всех условий и воздействий, влияющих на результат измерений. К этим условиям относятся: температура окружающей среды, атмосферное давление, относительная влажность воздуха, вибрация, запыленность, освещенность, уровень шума и другие.

Задача выбора оптимальных внешних условий состоит в том, чтобы погрешности результата измерений вследствие их влияния были минимальны и их значения можно было заранее определить.

Требования к некоторым параметрам рабочей среды измерительных лабораторий:

1. Освещенность. При организации рабочих мест операторов следует учитывать санитарно-гигиенические нормы и требования к освещению, что позволяет улучшить труд оператора, снизить утомляемость и увеличить производительность труда.

Помещения лаборатории должны иметь достаточную освещенность. Дневной свет должен быть рассеянным и не иметь бликов. Во избежание действия солнечных лучей на окна лаборатории следует повесить белые шторы. Источники света необходимо заключить в арматуру с матовым или молочным стеклом. При этом общее освещение должно быть в помещении, где проводят грубые работы средней и малой точности, когда направление света не играет большой роли.

Комбинированное освещение необходимо при выполнении точных работ и работ высокой точности, когда для различения объекта требуется особое направление света.

Одно местное освещение нормами не допускается, так как оно приводит к неравномерному распределению яркостей в поле зрения наблюдателя. Если яркость периферии V_n больше яркости центра V_c , то резко снижается производительность труда, увеличивается число ошибок в работе и наступает утомление. Общее освещение следует использовать так, чтобы

$V_n < V_c$, ибо темная периферия меньше влияет на состояние адаптации к яркости поля зрения, чем светлая.

2. Влияние температуры на результаты измерения. Отклонения от нормальной температуры приводят к появлению по-

Точность измерительных приборов

грешностей измерения. Причиной возникновения погрешностей являются температурные деформации вследствие разности нагрева измерительного средства и объекта измерения, а также разности их коэффициентов линейного расширения.

Температура не остается постоянной в разных местах помещения как по площади, так и по высоте, если в помещении не приняты специальные меры для ее стабилизации.

Многочисленные опыты измерения температуры изделий и приборов, находящихся в обычном механосборочном цехе или измерительной лаборатории, показали, что на разных участках сравнительно небольших объектов (50—100 мм) температура различается на 2—3°C на поверхности и несколько больше внутри.

В лабораториях следует поддерживать постоянную температуру 4-20° С.

В помещениях, где по характеру проводимых измерений отклонения от нормальной температуры не должны превышать $\pm 2^\circ\text{C}$, необходимо предусмотреть устройство терморегулирующих установок для поддержания постоянства температуры.

К нормальной температуре следует приводить результаты измерений с помощью средств измерений. В особо ответственных случаях, как, например, при аттестации плоскопараллельных концевых мер длины, устанавливаются допуски на отклонения от нормальной температуры и допускаемые изменения температуры за определенное время.

Соблюдение этих температурных условий обеспечивает снижение температурных погрешностей.

Следует отметить, что одинаковые отклонения температуры детали и прибора от нормальной температуры (т. е. от 20° С) более благоприятно, чем разница в температурах измеряемой детали и прибора.

Эффективным методом сокращения погрешности вследствие температурных деформаций является создание условий измерения, при которых этими погрешностями можно пренебречь.

3. Шум и вибрации. Воздействие шума снижает производительность труда на 10—25%. Однако не все уровни частот шума оказывают одинаковое влияние. Известно, что низкочастотные шумы относительно безвредны, а высокочастотные шумы оказывают наиболее раздражающее действие.

В измерительных и поверочных лабораториях необходимо, чтобы в лабораторном помещении уровень шумов не превышал 40—45 дБ.

Точность измерительных приборов

Вибрация вызывает у человека своеобразное ощущение сотрясения. Диапазон ощущения вибрации у человека находится в пределах от 1 до 10000 Гц. Наиболее высокая чувствительность к частотам 200—250 Гц.

Сотрудники американской фирмы «Боинг» считают, что вибрация в лабораториях по измерению линейных размеров, оптических величин, измерению давления вакуума, ускорения и сил не должна превышать 0,001 или 0,25 мкм при частоте не менее 200 Гц у основания прибора. Для других лабораторий требования не оговариваются. При этом фирма считает, что для обеспечения вибрационной устойчивости лаборатории необходимо, чтобы бетонный фундамент здания был уложен без опалубки непосредственно в грунт которому была придана требуемая форма. Максимальная нормальная вибрация, которой подвергается конструкция здания, составляет ± 6 микродюймов ($\pm 8 \cdot 25,4 \cdot 10^{-3}$ мм) и по мере дальнейшей выдержки бетона фундамента будет уменьшаться.

Согласно требованиям уровень акустического шума в измерительных лабораториях не должен выходить за пределы частотного диапазона 20—96000 Гц с учетом всасывающих и вытяжных вентиляторов, но без учета гидро- и пневмосистем. Для обеспечения требуемых рабочих условий необходимо применять в метрологических лабораториях звукоизоляцию.

4. Относительная влажность воздуха. В состав окружающей нас атмосферы входит водяной пар, на долю которого приходится не более 4% общего объема воздуха. Количество пара изменяется в пределах этого объема в зависимости от температуры воздуха. Так, в одном кубическом метре воздуха в 30-градусную жару может содержаться 30 г воды, а в сильный мороз — самое большее 0,5 г. Это предельные или «насыщенные» количества для соответствующих температур. Если количество водяного пара превышает уровень насыщения, то излишек влаги выделяется в виде капелек тумана. Чаще всего количество водяного пара в воздухе меньше насыщающего. Поэтому влажность воздуха удобно характеризовать отношением фактического количества водяного пара к насыщающему при данной температуре. Это отношение, выраженное в процентах, и называют относительной влажностью.

Относительная влажность в помещениях лаборатории должна быть $58 + 20\%$ в зависимости от характера выполняемых работ.

Точность измерительных приборов

Общие требования к помещениям измерительных лабораторий можно сформулировать следующим образом.

1. Измерительную лабораторию должны размещать в отдельном здании или помещении с учетом того, чтобы колебания почвы или строения, вызываемые работой агрегатов и проезжающим транспортом, не влияли на результаты работы измерительных приборов

2. Помещения лаборатории должны быть сухими и изолированы от химико-физических лабораторий, электролитических цехов, шлифовальных и других производственных участков, могущих служить источником коррозии измерительных приборов и проникновения пыли. Паро-газопровод проводить через помещения лаборатории не допускается.

3. Общая производственная площадь центральной лаборатории измерительной техники устанавливается из расчета 3,5—5 м² на один стационарный прибор, установку или одно рабочее место.

К расчетной площади лаборатории прибавляется площадь для вспомогательного и хозяйственного оборудования. Высота помещений должна быть не менее 3—3,5 м. Стены помещения лаборатории на 0,75 высоты следует окрашивать масляной краской матовых светлых тонов, верхнюю часть стен — клеевой краской, потолок — белой масляной краской. Пол рекомендуется покрывать линолеумом.

4. Помещения лаборатории, где средства измерений готовят к поверке, должны быть оборудованы вытяжными шкафами для промывки и металлическими шкафами для хранения легковоспламеняющихся материалов (бензин, спирт) в соответствии с требованиями пожарной охраны и техники безопасности.

В лабораториях линейных и оптических измерений должно быть небольшое смотровое окно, выходящее в коридор и дающее возможность наблюдать за работой, не входя в служебное помещение.

20. ПОВЕРОЧНЫЕ СХЕМЫ

Единообразие и достоверность средств измерений, применяемых в различных областях народного хозяйства страны, могут быть обеспечены лишь в том случае, если правильные значения единиц измерений от эталонов к образцовым, а от образцовых к рабочим, средствам измерений будут передаваться при условии соблюдения градуировки и поверки средств измерений по единым для государства эталонам. Документами, устанавливающими этот порядок, являются поверочные схемы. Схемы подразделяют на общесоюзные и локальные.

Общесоюзные поверочные схемы должны служить основанием для составления локальных поверочных схем и для разработки государственных стандартов и методик на методы и средства поверки образцовых и рабочих средств измерений. Общесоюзные поверочные схемы утверждаются в качестве государственных стандартов.

Локальные поверочные схемы утверждает руководитель предприятий или организаций, в которых используется данная поверочная схема, по согласованию с органами государственной метрологической службы, осуществляющими для них поверку исходных образцовых средств измерений, включенных в поверочную схему, в локальную поверочную схему должны быть включены все находящиеся в эксплуатации или выпускаемые в обращение рабочие средства измерений данной физической величины.

Поверочные схемы состоят из текстовой части и чертежа. В локальные поверочные схемы допускается не включать текстовую часть. На чертеже поверочной схемы указывают наименования средств измерений, диапазоны значений физических величин, обозначения и оценки погрешностей и конкретные методы поверки.

Методы поверки, указываемые на поверочной схеме, должны отражать специфику поверки данного вида измерений. Они соответствуют одному из следующих общих методов:

- непосредственному (т. е. без компаратора) сличению поверяемого средства измерений с образцовым средством измерений того же вида (т. е. меры с мерой или измерительного прибора с измерительным прибором);
- сличению поверяемого средства измерений с образцовым средством измерений того же вида при помощи компаратора;
- прямому измерению поверяемым измерительным

Точность измерительных приборов

прибором величины, воспроизведенной образцовой мерой;

- прямому измерению образцовым измерительным прибором величины, воспроизведенной подвергаемой поверке мерой;
- косвенным измерениям величины, воспроизводимой мерой или измеряемой прибором, подвергаемым поверке;
- независимой поверке, т. е. поверке средств измерений относительных (безразмерных) величин, не требующей передачи размеров единиц от эталонов или образцовых средств измерений, проградуированных в единицах размерных величин.

Текстовая часть поверочной схемы состоит из вводной части и пояснений к элементам поверочной схемы.

Чертеж поверочной схемы состоит из нескольких полей, соответствующих ступеням передачи размеров единиц от государственного эталона или от исходного образцового средства измерений рабочим средствам измерений. Поля отделены друг от друга горизонтальными пунктирными линиями. В левой части поверочной схемы по вертикали указывают наименование элементов поверочной схемы. В самих полях размещают структурные элементы поверочной схемы, заключаемые в прямоугольники и круги (прямоугольники для эталонов, образцовых и рабочих средств измерений, круги для методов поверки).

Соподчиненность структурных элементов указывают соединительными линиями.

В верхнем поле поверочной схемы указывают наименования эталонов. Наименование первичного эталона заключают в прямоугольник, обведенный двойной линией. Ниже первичного эталона в том же поле указывают наименование вторичных эталонов и диапазон, в котором они хранят единицу измерений. Наименования вторичных эталонов заключают в прямоугольники, обведенные одной линией.

Под полем эталонов располагают поля образцовых средств измерений 1-го и других разрядов, помещая в каждое из них наименование образцовых средств измерений соответствующего разряда. Наименования образцовых средств измерений с указанием диапазонов и погрешностей поверки заключают в прямоугольники аналогично вторичным эталонам.

Под полем образцовых средств измерений низшего разряда помещают поле рабочих средств измерений. Рабочие средства измерений подразделяют по точности и диапазонам измерений на группы, располагая группы в порядке убывающей точности так, чтобы наименования наиболее точных средств измерений

Точность измерительных приборов

находились в левой части поля.

На поверочной схеме указывают в кругах (или при наименовании метода, состоящим из нескольких слов, — в овале) конкретные методы поверки, применяемые в данной области измерений, руководствуясь при этом приведенной выше классификацией.

Круги располагают между наименованиями объектов поверки и образцовых средств измерений, применяемых для их поверки, причем, если эти круги находятся не в поле эталонов, их располагают в разрывах пунктирной линии, разделяющей соответствующие поля схемы.

Передачу размеров единиц от эталонов образцовым и рабочим средствам измерений изображают сплошными линиями, проходящими через круг, в котором указан метод поверки. Соединительные линии, как правило, не должны пересекаться.

Основы построения поверочных схем

Анализ действующих поверочных схем показывает, что в настоящее время их составляют преимущественно эмпирически на основе существующих типов средств измерений и установившихся методах поверки.

Основными характеристиками государственных поверочных схем, подлежащим определению при расчете, следует считать:

- метод нормирования погрешностей;
- отношения нормируемых погрешностей приборов, находящихся на соседних ступенях поверочной схемы (C);
- число ступеней поверочной схемы (m).

Изучение форм распределения общих погрешностей посредством групп однотипных средств измерений позволило разработать теоретическую модель распределения, включающую стандартные законы: двойной экспоненциальный, нормальный, равномерной плотности и описывающий промежуточные формы.

Отношение погрешностей образцового и поверяемого средств измерений можно рассчитать по заданной вероятности брака поверки.

В зависимости от объема информации о распределениях погрешностей образцового и поверяемого приборов методы расчета (C) делятся на три вида:

- 1) теоретическую оценку;
- 2) ориентировочный расчет;

Точность измерительных приборов

3) уточненный расчет.

Первый опирается на изучение погрешности одного—трех экземпляров средства измерения данного типа; второй — на экспериментальные данные о погрешностях группы, состоящей из 10—20 поверяемых средств измерений, и гипотезу о равновероятном распределении погрешностей образцовых средств измерений; третий — на экспериментальные данные о распределении погрешностей по группе, состоящей из 100 или более средств измерений, и оценку формы распределения погрешностей группы образцовых средств измерений.

Расчет числа ступеней поверочной схемы обеспечивает метрологически обоснованные отношения между погрешностями образцовых и поверяемых средств измерений на всех ступенях поверочной схемы при заданном общем запасе точности между эталоном и рабочим средством измерений, находящимся на нижней ступени.

21. МЕЖДУНАРОДНАЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ РАБОТА

Метрологические институты проводят большую международную работу. Советский Союз является активным членом практически всех международных организаций, занимающихся вопросами метрологии и стандартизации.

Метрологические институты принимают участие в деятельности Международной организации законодательной метрологии (МОЗМ) и ведут ряд секретариатов этой организации: по классам точности, манометрам, счетчикам, мерам длины, оптическим пирометрам. Ряд метрологических работ проводится также в рамках Международной организации по стандартизации (ИСО) и Международной электротехнической комиссии (МЭК) в области единиц измерения, акустики, шероховатости поверхности и других.

22. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ И ХАРАКТЕРИСТИК ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

По мере расширения работ по созданию новых эталонов и же развитию методов точных измерений назрела необходимость в достоверных значениях физических констант, характеризующих свойства веществ и тел.

Определение и уточнение фундаментальных физических констант проводятся в лабораториях Англии, США, ФРГ, и других стран.

Эти исследования имеют два аспекта — физический и метрологический. Первый из них связан с научно-техническим прогрессом и вытекающей из него необходимостью все более точного описания физических процессов и закономерностей. Второй — связан с проблемой воспроизведения единиц ряда физических величин при помощи физических констант.

В настоящее время можно говорить в принципе о воспроизведении единиц через некоторые константы. Обычно именно в этом смысле понимают задачу перехода на естественные эталоны, т. е. на путь прямого использования физических констант в метрологии. В первую очередь это относится к гиромангнитному отношению протона, посредством которого можно воспроизводить размер абсолютного ампера, а также размер вольта через отношение постоянной Планка к заряду электрона. Непосредственный же переход на естественные эталоны станет возможным тогда, когда точность определения физических констант повысится по крайней мере на порядок. К этим константам относятся магнитный момент протона, постоянная тонкой структуры, постоянная Планка, заряд электрона, массы протона и нейтрона и число Авогадро.

Наибольшая достоверность значений этих констант, равно как и других, получается на основе обработки данных по результатам определения многих констант. Это обстоятельство требует совершенствования методов и средств по измерениям констант, а также сбора и анализа данных.

Так как измерение констант должно производиться на высшем уровне точности, естественно, что наибольшее развитие эти работы имеют в метрологических институтах, в которых эталоны позволяют достигнуть высшей точности измерений.

В течение последних десятилетий все возрастающее значе-

Точность измерительных приборов

ние приобретают стандартные образцы веществ и материалов.

Под стандартными образцами принято понимать образцы веществ или материалов, химический состав или физические свойства которых типичны для данной группы веществ и материалов, определены с необходимой точностью, отличаются высоким постоянством и удостоверены сертификатом.

Стандартные образцы применяются для градуировки и проверки средств и методов измерений, а также для контроля качества¹ промышленной продукции путем непосредственного сличения. Таким образом, стандартные образцы служат для поддержания единства измерений в стране, т. е. являются средствами измерений. Специфическая особенность стандартных образцов состоит в том, что они расходуются в процессе измерений (все образцы химического состава, образцы теплоты сгорания и т. п.).

Область применения стандартных образцов охватывает ключевые отрасли современной промышленности. С их помощью измеряют и контролируют различные свойства веществ и материалов, а также их химический состав.

Из числа образцовых веществ, разработанных и выпускаемых метрологическими институтами, можно отметить:

- бензойную кислоту высокой чистоты, применяемую в качестве образцового вещества для определения теплового эквивалента калориметров, при помощи которых измеряют удельную теплоту сгорания различных топлив, а также для градуировки калориметров, используемых при определении теплоемкости при низких температурах;

- образцы полиметилкрилата, при помощи которого градуируют приборы для измерения теплопроводности и температуропроводности при 20—100° С;

- образцы чистой сурьмы для воспроизведения реперной точки шкалы температур;

- образцы кварца и корунда для аттестации дилатометром в диапазоне температур до 900° С;

- образцы твердости для контроля приборов измерения твердости металла;

- образцовые масла для контроля приборов измерения вязкости нефтепродуктов при обычных температурах и давлениях;

- образцовые жидкости для аттестации измерителей вязкости и плотности жидкостей при высоких давлениях;

- образцы магнитотвердых и магнитомягких материалов;

- образцы диэлектриков для аттестации измерителей

Точность измерительных приборов

диэлектрической постоянной и угла потерь диэлектриков на сверхвысоких частотах;

- образцы белизны поверхности;
- образцы шероховатости для контроля профилометров и другой аппаратуры, с помощью которой измеряют шероховатость поверхности.

23. СВЕДЕНИЯ О ВОЗМОЖНОСТЯХ СОВРЕМЕННОЙ МЕТРОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Государственный эталон является высшим пределом точности воспроизведения основных и производственных единиц измерения, достигнутым в данное время.

Сопоставляя требования современной науки и техники с точностью существующих эталонов, нетрудно убедиться, что большинство имеющихся эталонов физических величин либо не удовлетворяет полностью этим требованиям, либо обладает слишком малым запасом точности и, следовательно, нуждается в существенном усовершенствовании. Необходимость создания новых, значительно более совершенных эталонов составляет одну из главнейших задач метрологии на ближайшее будущее.

Так, для того чтобы удовлетворить, например, требования современного прецизионного станкостроения, погрешность воспроизведения метра должна быть снижена более чем в два раза. Требования к точности измерения времени и частоты, вытекающие из нужд науки и практики {в частности, навигации), приводят к необходимости уменьшения погрешности воспроизведения секунды на полтора порядка и доведения ее до $5 \cdot 10^{-13}$. В два и более раз должна быть снижена погрешность воспроизведения канделы, ампера, вольта, ома, единицы вязкости и т. д. Кроме того, необходимо существенно расширить область воспроизведения с высокой точностью единиц температуры, силы, давления, плотности, вязкости. Например, уже сейчас необходимы достаточно точные измерения температур до 100000°C , давления до $10^{10}—10^{11}$ Па ($10^5—10^6$ атм), вакуума до $1,3 \cdot 10^{-11}—1,3 \cdot 10^{-12}$ Па ($10^{-13}—10^{-14}$ мм рт. ст.) и т. д. [1.57].

Совершенствование или создание новых более точных эталонов является крайне сложной и трудной задачей.

Успехи современной науки и прежде всего физики открывают новые пути и способы эталонирования главнейших физических величин.

Речь идет об использовании в указанных целях молекулярных, атомарных и ядерных процессов. Огромным преимуществом применения этих физических процессов для эталонирования единиц измерения является неза-

Точность измерительных приборов

внешних условий, строгая закономерность в ходе процесса и сравнительная простота их воспроизведения.

Применение физических процессов для эталонирования физических величин началось с использования световых волн в качестве единицы длины, т. е. для воспроизведения метра. Наиболее удачной оказалась «оранжевая» линия изотопа криптона-86, применение которой обеспечивает в принципе погрешность воспроизведения метра не более $2-3 \cdot 10^{-9}$. Однако эта теоретическая возможность полностью нереализуема.

В настоящее время требования к точности производственных линейных и угловых измерений сопоставимы с требованиями к точности эталонов. В первую очередь это относится к прецизионному станкостроению.

Созданная метрологическая база для развития прецизионного машиностроения и приборостроения позволяет решать новые задачи, связанные с разработкой более совершенных средств измерения длины до 2 м с погрешностью $\pm 3 \cdot 10^{-8}$ и углов с погрешностью $\pm 0,05$.

Метрологические институты работают над созданием аппаратуры для измерения длин (в том числе больших) с применением оптических квантовых генераторов, новых высококачественных стабильных во времени штриховых и концевых мер длины; универсальных автоматических измерительных приборов для измерений до 1 м с погрешностью ± 1 мкм и менее. Создается ряд новых производственных приборов высокой точности, позволяющих автоматизировать не только процесс измерения линейных и угловых размеров, но и введение поправок.

Современное состояние достижимой точности линейных и угловых измерений приведено в таблице 5.

Таблица 5.

Виды измерений	Предел	Погрешность
Абсолютные измерения концевых мер	До 120 мм До 1200 мм	$\pm 0,003$ мкм $\pm 1 \cdot 10^{-7}$
Плоскостность концевых мер длины	От 3 до 100 мм	$\pm 0,03$ мкм
Измерение штриховых мер	До 1 мм	$\pm 1 \cdot 10^{-7}$
Измерение геометрической формы изделий	До 200 мм До 500 мм	$\pm (2-3)$ мкм ± 5 мкм
Контроль прямолинейности и плоскости поверхностей большой протяженности	До 4 м	± 3 мкм на 1 м длины
Измерение углов	-	$\pm 0,2$

24. ПРИМЕНЕНИЕ ЛУЧА ЛАЗЕРА В МЕТРОЛОГИИ

Использование электромагнитного излучения атомов и молекул для воспроизведения секунды стало возможным после создания квантовых усилителей в радиоволновом и оптическом диапазонах или, как их принято теперь называть, мазеров и оптических квантовых генераторов (лазеров).

В последнее время созданы полупроводниковые оптические квантовые генераторы, главной особенностью которых являются миниатюрные размеры и высокий, приближающийся к единице коэффициент полезного действия (для сравнения укажем, что коэффициент полезного действия возбуждаемых вспышкой света газовых и кристаллических оптических квантовых генераторов не превышает 1 %).

Квантовые усилители и генераторы уже широко применяются в технике связи для создания новых технологических процессов обработки материалов в медицинском оборудовании и т. д.

В метрологии они используются как генераторы стандартной частоты и служат для эталонирования единицы времени, обеспечивая высокую точность воспроизведения секунды.

С этой точки зрения квантовые генераторы можно рассматривать как новый вид часов, а именно как «молекулярные часы».

Изобретение лазеров и мазеров открыло новые возможности для метрологии не только в отношении эталонирования времени и частоты, но и в других направлениях. Так, лазеры с большим успехом могут быть использованы в качестве мощных источников когерентного излучения при интерференционных измерениях длин с большой точностью, а следовательно, для создания новых методов нанесения линейных шкал и т. п. Преимущество применения лазеров в качестве источника оптического излучения по сравнению с криптоновой лампой заключается в значительно большей степени когерентности излучения лазера. Поэтому на основе лазера можно создать интерферометры с длиной плеча в 100 и более метров вместо нескольких дециметров, доступных для криптонового интерферометра, и тем самым значительно повысить точность измерений длины.

Лазер — уникальный источник излучения, удачно сочетающий такие свойства, как высокая монохроматичность, малая расходимость луча и большая интенсивность, благодаря чему он (в сочетании с оптико-электронными устройствами) оказался одним из лучших средств для измерения длин, скоростей и оптиче-

Точность измерительных приборов

ских характеристик различных сред.

С помощью лазерного интерферометра в весьма широком диапазоне можно измерить все, что влияет на оптическую длину измерительного плеча. Это, с одной стороны, линейные перемещения и производные от них — скорости и ускорения, а с другой стороны, показатель преломления среды и влияющие на него параметры: давление, температура, содержание примесей различных веществ и т. д.

Разрешающая способность лазерного интерферометра чрезвычайно высока.

Уже сегодня с его помощью можно регистрировать измерения длины на тысячные доли ангстрема, т. е. на 10^{-13} м.

Перспективность лазерной интерферометрии характеризуется еще и тем, что высокая интенсивность излучения лазера позволяет создавать оптические системы, на работу которых не влияют вибрации, шум, внешнее освещение и даже некоторая запыленность воздуха.

Безусловно, по экономическим, а иногда и по техническим причинам лазерный интерферометр целесообразно использовать далеко не для всех тех видов измерений, где он принципиально применим.

Областей эффективного применения лазерных измерительных систем уже достаточно много, и по мере прогресса лазерной техники число их непрерывно увеличивается. Их прежде всего используют в линейных измерениях, в самых широких диапазонах.

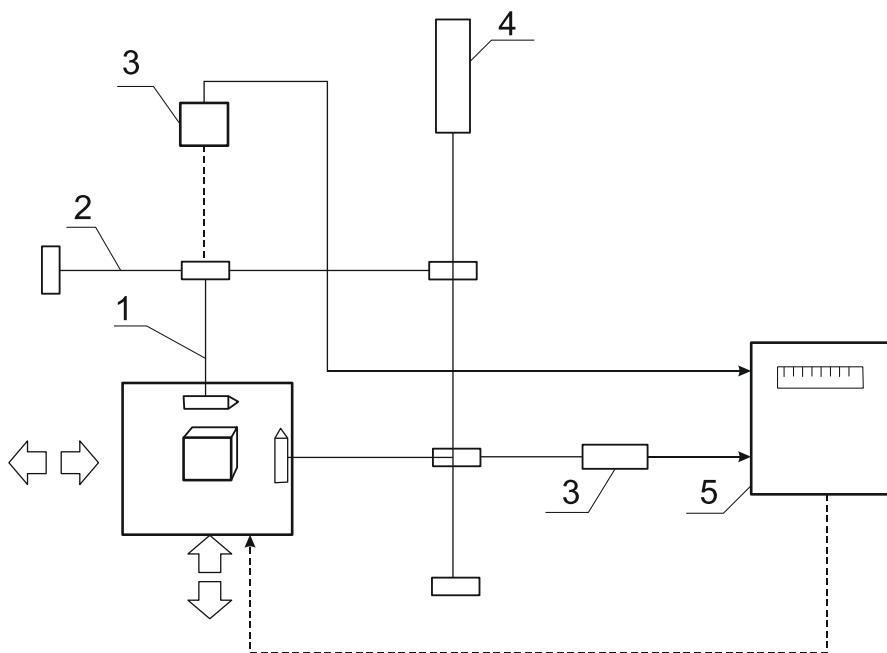


Рис. 35 Управление механизмом перемещения

Лазерные интерферометры с диапазоном измерения до 200 мм уже используют в микроэлектронике при изготовлении интегральных схем. Для нанесения элементов интегральных схем необходимо проводить их покадровое проекционное впечатывание на подложку. При этом каждый следующий кадр должен впечатываться после перемещения подложки на строго определенный размер. От точности перемещения зависит совмещение элементов, а также максимальный размер подложки. С использованием двухкоординатного лазерного интерферометра удалось примерно в 10 раз точнее, чем раньше, контролировать перемещение столика с подложкой.

Это позволило увеличить плотность упаковки элементов интегральных схем и перейти к изготовлению больших интегральных схем, необходимых для создания сверхминиатюрной радиоэлектронной аппаратуры, для превращения многих еще уникальных изделий в товары широкого потребления. Внедрение лазерной интерферометрии поможет сделать, например, элек-

Точность измерительных приборов

тронные вычислительные машины типа БЭСМ, занимающие сегодня несколько комнат, неотъемлемой частью письменного стола ученых.

Принципиальная схема показана на рисунке 35, где 1 — измерительный луч; 2 — опорный луч; 3 — фотоприемник; 4 — лазер; 5 — электронно-счетное устройство. Для упрощения на схеме не изображено устройство, с помощью которого осуществляют технологический процесс.

Известно, что измерения в метровом диапазоне наиболее часто проводят с помощью обычных штриховых мер длины — линеек. Однако и здесь применение лазерных интерферометров позволяет повысить точность измерений. Например, в Англии для проверки самих штриховых мер применили автоматический лазерный интерферометр, что повысило точность работы и ускорило операцию проверки в 500 раз.

Лазерный интерферометр в диапазоне измерений до 10 м уже применяют в ряде областей машиностроения и приборостроения.

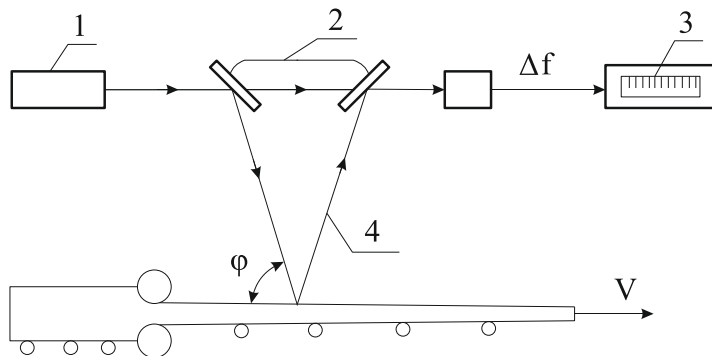


Рис. 36. Лазерный интерферометр

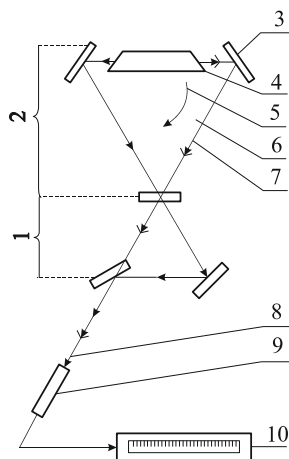


Рис. 37. Лазер для угловых измерений

Созданы точные и удобные в работе лазерные интерферометры для координатно-измерительных машин, а также для настройки металлорежущих станков. Результаты измерений, вплоть до долей микрона, легко различаются на цифровом табло или поступают в цифропечатающую машину.

Километровый диапазон

В настоящее время разработаны экспериментальные лазерные интерферометры, работающие при длине измерительного плеча несколько более 1 км с разрешением 10^{-6} мкм.

Применяя несколько модифицированный лазерный интерферометр, можно измерять скорости перемещения объекта. При этом используется эффект Допплера, т. е. изменение частоты света в зависимости от скорости перемещения излучателя (или отражателя). Интерферометры позволяют получать достаточный отраженный сигнал непосредственно от поверхности металлических деталей и по доплеровскому смещению частоты оценивать скорость изменения расстояния до этой поверхности.

В ряде случаев, например при бесконтактном контроле скорости горячей прокатки, такие системы (рис. 1.26) оказываются наиболее эффективными. При этом зависимость между скоростью прокатки (V), скоростью света (C), частотой излучения лазера (f) и доплеровским смещением частоты можно представить выраже-

Точность измерительных приборов

$$\text{нием } V = C \frac{\Delta f}{f \cos \varphi}.$$

На рисунке: 1 — лазер; 2 — опорный луч; 3 — электронно-счетное устройство; 4 — измерительный луч.

Кроме того, разработаны первые лазерные бесконтактные доплеровские измерители для непрерывного контроля и коррекция внешних и внутренних диаметров деталей непосредственно в процессе их обработки с погрешностью 0,1—0,2 мкм.

Угловые измерения. В лазере, который применяется для линейных измерений, луч распространяется вперед и назад между двумя зеркалами, многократно проходя усиливающую свет активную среду. Такие лазеры называют линейными. В лазере для угловых измерений луч генерации направлен по замкнутому контуру (рис. 1.27). Этим объясняется и название лазера — кольцевой. На рисунке: 1 — интерферометр; 2 — кольцевой резонатор; 3 — отражатель; 4 — активная среда; 5 — угловая скорость вращения; 6 — площадь; 7 — периметр; 8 — интерференционная картина; 9 — фотоприемник; 10 — электронно-счетное устройство.

На основании такого лазера создан измеритель угловых скоростей и перемещений в пространстве — лазерный гироскоп.

Кольцевой оптический резонатор образован тремя зеркалами. Световые волны лазерного излучения усиливаются в гелий-неоновой активной среде и распространяются по периметру треугольника в противоположных направлениях. На одном из углов резонатора закреплены зеркала для получения интерференционной картины встречных волн и регистрирующее устройство — фотоприемник.

Как же происходит измерение с помощью лазерного гироскопа? В кольцевом резонаторе бегут в противоположные стороны две волны лазерного излучения. В покоящемся резонаторе волны имеют равные частоты. Если же резонатор вращается в своей плоскости, то время обхода резонатора одной волной увеличивается, а другой волной на столько же уменьшается. Частота волны-лазерного излучения зависит от времени обхода ею резонатора. Поэтому при вращении появляется разность частот встречных волн. Разность частот Δf пропорциональна скорости вращения в пространстве. Соответственно и скорость движения полос интерференционной картины в лазерном гироскопе пропорциональна угловой скорости.

Регистрирующее устройство преобразует интенсивность

Точность измерительных приборов

света в электрический сигнал. Для измерения угла поворота, подсчитывают число периодов сигнала, а для измерения угловой скорости достаточно определить его частоту.

Лазерный гироскоп обладает угловым разрешением, недоступным механическим гироскопам. Так, если оптический резонатор имеет форму треугольника со стороной около 12 см, то каждому периоду синусоиды выходного сигнала соответствует поворот на одну угловую секунду.

Показания лазерного гироскопа не зависят от линейных и угловых ускорений, выходной сигнал легко обрабатывается электронно-счетными машинами, которые все шире применяют в навигационных системах. С помощью такого гироскопа можно измерять угловые скорости от тысяч оборотов в секунду до скоростей в сотни миллиардов раз меньших.

Конструктивно подобен лазерному гироскопу прибор для измерения линейных скоростей и расходов в потоках оптически прозрачных сред, например, скорости ветра, течения воды и т. п. Значение скорости определяется в данном случае по относительному сдвигу частот двух встречных лучей, вызванному эффектом Френеля, т. е. изменением частоты света, проходящего через движущуюся среду. Диапазон измерения прибора — от 1 м/ч до десятков метров в секунду (скорость урагана). Прибор этот отличается высокой чувствительностью, в нем нет движущихся частей, он безынерционен, исключено какое-либо влияние на измеряемый поток, что особенно важно при измерении, например, скорости истечения газов.

Визирование по лазерному лучу. Используя малую расходимость лазерного луча в сочетании с его высокой интенсивностью, можно создать относительно простые приборы для ориентирования различных объектов по лучу.

На аналогичном принципе построен прибор для нивелировки направляющих крупногабаритных станков. В диапазоне нескольких десятков метров здесь обеспечивается точность до 2 мкм на 1 м.

Таким же образом работает и лазерный зенит-центрир, который контролировал вертикальную ось при строительстве Останкинской телебашни с точностью до 6 мм.

25. ЭФФЕКТ МЕССБАУЭРА И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В МЕТРОЛОГИИ

Эффект Мессбауэра, открытый немецким ученым Р. Мессбауэром в 1958 г., заключается в следующем. Возбужденные ядра, как известно, могут испускать гамма-лучи, т. е. фотоны большой энергии. Обратное под действием фотона, т. е. при поглощении последнего, ядро может возбудиться, если только энергия фотона соответствует переходу ядра с низшего на один из высших энергетических уровней.

В таком резонансном поглощении гамма-квантов ядрами собственно и заключается эффект Мессбауэра с тем только отличием, что в качестве излучателя гамма-квантов берется не обычное, а изомерное ядро.

Эффект Мессбауэра наблюдается только в том случае, когда отдачу воспринимает весь кристалл, а это значит, что, как и при выстреле из очень тяжелого орудия, вся энергия, запасенная в пороховом заряде, передается снаряду, а орудие остается неподвижным, т. е. энергия отдачи оказывается пренебрежимо малой.

К тому же оказалось, что тепловые колебания атомных ядер, связанных в кристаллической решетке твердого тела, не нарушают условий резонансного поглощения или рассеяния, а влияют лишь на его величину, несмотря на наличие явления Допплера, т. е. изменения воспринимаемой частоты или энергии гамма-квантов в случае, когда источник излучения движется относительно поглотителя излучения.

Подчеркнем, что все эти закономерности проявляются лишь в том случае, когда рассматриваются атомные ядра, входящие в состав твердого тела.

Особенностью изомерных ядер является то, что они сравнительно долго находятся в возбужденном состоянии (от нескольких лет до 10^{-8} с), тогда как время, в течение которого обычное ядро переходит из возбужденного в невозбужденное состояние, исчисляется примерно 10^{-23} с. Благодаря этому разброс в энергии испускаемых изомерным ядром гамма-квантов (или, что то же самое, ширина энергетического уровня и спектральной линии излучения) будет во много раз меньше, чем у обычного ядра, и составит не более 10^{-13} .

Таким образом, если облучаемая мишень испускает гамма-кванты, то энергия поглощаемых и испускаемых гамма-квантов, а

Точность измерительных приборов

следовательно, и частоты излучения источника и мишени в точности совпадают. В этом смысле и источник, и мишень являются как бы часами, дающими одинаковые показания; такая система и представляет собой «ядерные часы». Точность этих часов будет не менее 10^{-12} при использовании изомера железа или еще более высокой при использовании более долгоживущих изомеров. Заметим, что при помощи «ядерных часов» можно не только измерять время, но и проверять многие положения теории относительности Эйнштейна.

Значение эффекта Мессбауэра для науки и техники определяется его огромной чувствительностью: достаточно изменить энергию гамма-кванта на одну триллионную часть, а в некоторых случаях еще в тысячи раз меньше, как резонансное поглощение или рассеяние полностью исчезает. Таким образом, инженеры и ученые получили чувствительнейший индикатор любых воздействий, которые могут изменить энергию ядра-излучателя или ядра-поглотителя.

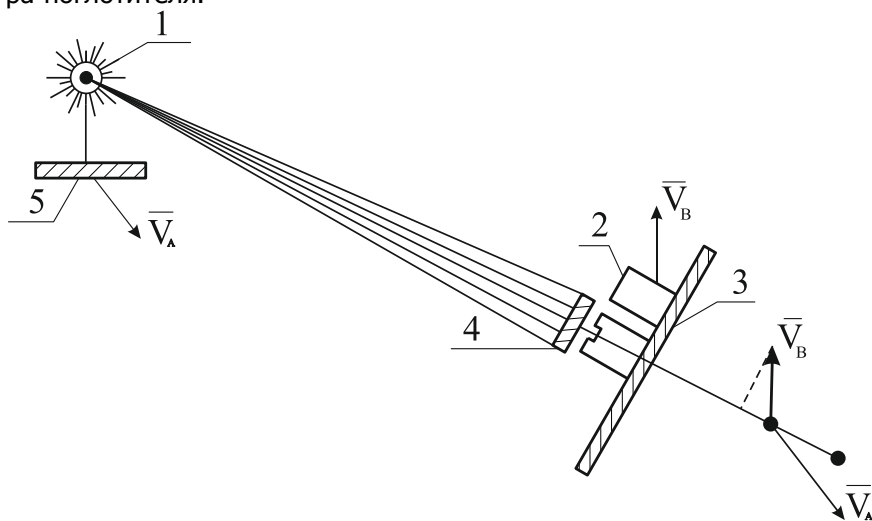


Рис. 38. Принципиальная схема лазерной установки

Эффект Мессбауэра может быть использован для измерений относительной скорости движения нескольких объектов и дистанционного автоматического управления скоростями их относительного движения; измерения вибраций деталей механизмов, величины и направления перемещения деталей в замкнутых системах, для измерения больших ускорений и скоростей вращения в

Точность измерительных приборов

изолированных системах, а также для измерения очень низких температур и высоких давлений.

Каждая из перечисленных задач требует специального подбора радиоактивного источника, поглотителя и регистрирующей электронной аппаратуры.

При определении относительной скорости движения двух объектов источник излучения жестко связывается с одним из объектов, поглотитель и счетчик гамма-излучения — с другим.

Источник и поглотитель должны быть в одинаковом химическом состоянии, для того чтобы максимальное поглощение гамма-квантов осуществлялось в случае, когда объекты находятся в покое друг относительно друга. При наличии относительного движения интенсивность прошедших через поглотитель гамма-квантов увеличится. Это увеличение может быть непосредственно сопоставлено с значением относительной скорости. Усложняя некоторым образом используемую аппаратуру, можно зафиксировать относительные скорости движения в диапазоне от 0,005 см/с до десятков метров в секунду. Сигналы об изменении скорости относительного движения могут быть связаны с управляющими движением механизмами, а закон изменения относительной скорости движения двух объектов заранее запрограммирован. Этот же принцип может быть положен в основу измерения очень малых скоростей перемещений конструкций различных объектов относительно земной поверхности, фиксации сдвигов земной коры в результате землетрясений и взрывов и т. д. Принципиальная схема установки показана на рисунке 38, где 1 — источник гамма-квантов; 2 — электронная схема; 3 — объект В; 4 — поглотитель; 5 — объект А; V_a — скорость движения объекта А; V_b — скорость движения объекта В.

Измерение малых перемещений деталей в замкнутых объемах

Источник гамма-излучения жестко связывают с перемещающейся деталью. Гамма-излучение, проникая через оболочку замкнутого объема 1, проходит через специальный поглотитель б и попадает на счетчик 2, установленный вне объема. Подбирают источник и поглотитель, устанавливаемый перед счетчиком гамма-излучения, как показано на рис. 39. При выбранной паре (источник и поглотитель) скорость счета возрастает, когда деталь движется от поглотителя, и падает при движении детали к погло-

Точность измерительных приборов

тителю. Скорость счета постоянно сравнивается с числом импульсов от генератора постоянной частоты 5 с помощью схем сравнения 4. Таким путем можно обнаружить величину перемещения от 10^{-4} до 10^{-1} см, направление перемещения и весь путь детали 7, если скорость перемещения не превышает 1 мм/с.

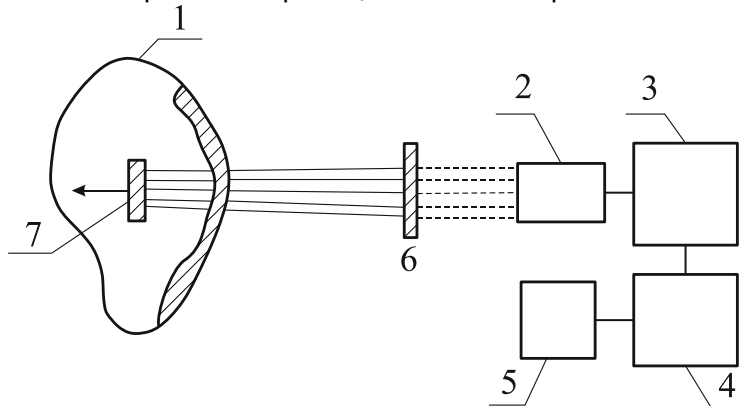


Рис. 39. Схема измерения малых перемещений деталей в замкнутых объемах.

При измерении высоких давлений в качестве поглотителей используют деталь, подверженную давлению или, если это технически неудобно, в исследуемую деталь можно ввести радиоактивные атомы, которые обнаруживают эффект Мессбауэра. При специально подобранной паре источник — поглотитель можно наблюдать изменение скорости счета гамма-квантов в зависимости от приложенного к детали давления. Метод может быть использован для определения деформаций и напряжений в твердых телах. Принципиальная схема установки показана на рис. 40, на котором 1 — объем, в котором создается импульсное давление; 2— счетчик; 3— электронная схема; 4— поглотитель; 5 — источник гамма-излучения.

Точность измерительных приборов

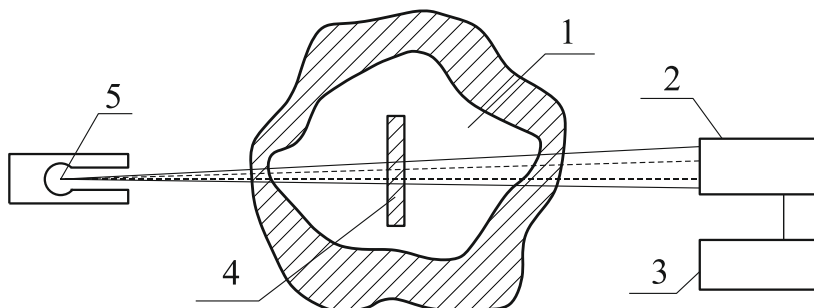


Рис. 40. Установка для определения деформаций и напряжений в твердых телах.

При измерении вибраций деталей механизмов источник гамма-квантов 1 (рис. 41) жестко укрепляют на вибрирующей детали, счетчик 3 с поглотителем 2 устанавливают на неподвижном основании. Источник и поглотитель должны быть идентичны по химическому состоянию мессбауэровских атомов и структуре. Измеряют разность интенсивностей гамма-излучения или разность скоростей счета приборов при вибрирующей и покоящейся детали. Показания фиксирует регистрирующая электронная схема 4.

Предварительно калибруя прибор, можно сразу определить произведение частоты вибрации на ее амплитуду. Следует считать вероятным обнаружение значений этого произведения начиная с 0,001 см/с. Например, если частота вибрации 10 Гц, то можно обнаружить амплитуды вибраций 1 мкм и выше.

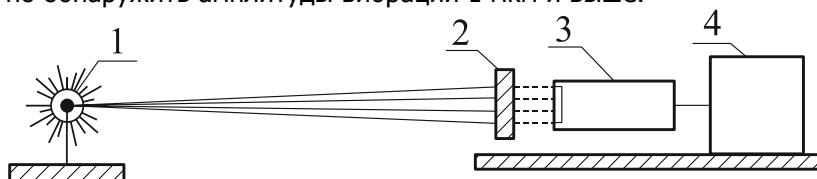


Рис. 41. Установка для измерения вибраций деталей механизмов.

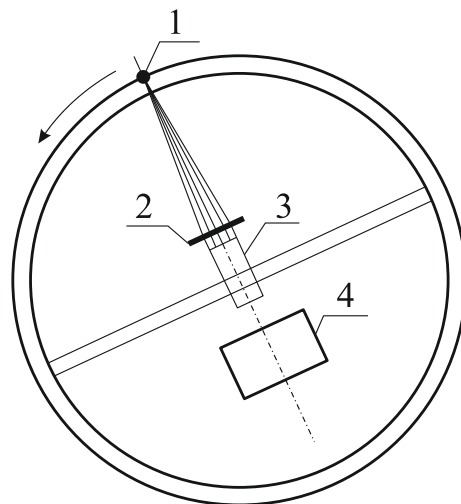


Рис. 42 Изолированная система.

При измерении скорости вращения в изолированных системах интенсивность гамма-излучения, прошедшего через поглотитель, при прочих равных условиях зависит от различия в ускорениях источника и поглотителя. Возникает возможность регистрации скорости вращения изолированной системы с помощью установки (рис. 42). На рисунке 1—источник гамма-излучения; 2 — поглотитель; 3 — счетчик; 4 — регистрирующая аппаратура. Расчеты показывают, что при отсутствии вибраций скорость вращения системы с радиусом 1 м можно зафиксировать с погрешностью до 0,2 об/с. Скорость вращения регистрируют внутри вращающейся системы. Используемое для этой цели устройство не имеет движущихся деталей.

26. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Метрологические институты разрабатывают средства градуировки приборов, предназначенных для измерения температуры, и аппаратуру для исследований, в которых требуется наивысшая точность.

В качестве метрологической основы исследований при разработке квантовых парамагнитных усилителей и быстродействующих вычислительных устройств, исследований кристаллов, полупроводников, получения сверхчистых веществ и многих других созданы эталонные и прецизионные приборы в установки, обеспечивающие высокий уровень точности и единообразие измерений низких температур в стране.

Таблица 6

Вид измерения	предел	Погрешность
Воспроизведение практической температурной шкалы при измерении:	4,2—10 К	$\pm 0,05$ К
	10—90 К	$\pm 0,05$ К
полупроводниковыми термометрами сопротивления, радиочастотными термометрами платиновыми термометрами сопротивления, радиочастотными термометрами платиновыми термометрами сопротивления	90—900 К	0,03 К при 90 К 0,0002 К при 273,16 К 0,0005 К при 373,15 К 0,0003 К при 692,7 К 0,02 К при 900 К $\pm (0,2-1)\%$ $\pm 0,005$ К при 4,2 К
Оптическое измерение температуры	500—10000 К 1,5-1336 К	$\pm 0,006$ К при 14 К $\pm 0,01$ К при 20 К $\pm (0,01-0,02)$ при $\pm 0,2$ К при 1336 К
Измерение теплофизических характеристик веществ:	0,1—1,6 Вт/(м·К) в температурном интервале 90—373 К	$\pm 3\%$
коэффициента температуро-проводимости	Ю-8—Ю-в μV в температурном интервале 90—ШОК	$\pm (3-5)\%$
коэффициента излучения удельной теплоты сгорания органических веществ	800—1300 К температура 298 К,	$\pm (10-20)\%$ $\pm (0,02-0,05)\%$
коэффициента расширения	температурный интервал 20—1100 к	10^{-4}

27. ИНТЕРСКОПИЯ

В последние годы в различных отраслях промышленности широко применяют методы интерскопии при неразрушающем контроле качества.

С помощью приборов-интерскопов (иначе их называют электронно-оптическими преобразователями) можно исследовать остаточные напряжения в металлах и других непрозрачных материалах после их термической или механической обработки, а также электрические неоднородности. Например, можно непосредственно при визуальном осмотре увидеть границу дырочной и электронной проводимости в полупроводниках.

Принцип действия интерскопов основан на преобразовании невидимых инфракрасных лучей в оптически видимые.

Любое тело, обладающее высоким коэффициентом пропускания в инфракрасном участке спектра, представляется совершенно прозрачным в приборах-интерскопах: его воспринимают как воду или какую-либо другую светлую жидкость, а твердое тело — как прозрачный кристалл. Инфракрасный интерскоп позволяет определить структурную неоднородность и степень чистоты материалов, прозрачных для инфракрасных лучей, изучить строение монокристаллов.

Видеть невидимое позволяют и ультразвуковые лучи. Короткие ультразвуковые волны распространяются в виде узких ограниченных пучков, которые используют для изучения структуры и внутренних неоднородностей оптически непрозрачных тел и сред. Так как ультразвуковые лучи подобно световым лучам могут отражаться и преломляться, то их фокусируют в виде звуковых изображений. Ультразвуковое изображение преобразуют в видимое с помощью специальной аппаратуры — электронно-акустического преобразователя. Подобная аппаратура позволяет обнаружить твердые тела и газовые пузыри в жидкости, а также трещины, раковины, шлаковые и металлические включения, пустоты в металлах.

28. ПРИМЕНЕНИЕ ХИМОТРОНИКИ В МЕТРОЛОГИИ

Химотроника — это химическая электроника, в которой используются электрохимические закономерности для создания электрохимических преобразователей — химотронов. Химотронные приборы обладают очень высокой чувствительностью. Так, химотронные информационно-измерительные преобразователи давления позволяют измерить изменение давления в одну миллионную долю атмосферы.

В этом случае прибор преобразует механическое воздействие в электрический сигнал, причем заполненный электролитом пластмассовый цилиндр с резиновыми плоскими доньшками разделен на два отсека перегородкой, в ней — узкое сквозное отверстие. В отверстие помещен катод. По обе стороны перегородки — аноды. Давление на резиновую мембрану вызывает перетекание жидкости из одного отсека в другой. Это резко увеличивает подачу йода к катоду, и ток цепи возрастает. Чем выше давление, тем больше ток.

Аналогично сконструированы другие химотронные информационно-измерительные преобразователи для измерения шумов, вибраций, ускорений и т. д.

29. ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ

Очевидно, что если для измерения деталей применялись бы абсолютно точные измерительные средства и строго регламентированные условия измерения, то результаты соответствовали бы истинным размерам этих деталей.

В силу ряда причин, рассматриваемых выше, применяемые методы измерения имеют существенные погрешности.

При выполнении измерения или контроля получаемые результаты зависят от погрешности измерения, суммируемой из составляющих погрешностей: погрешностей, присущих схеме измерения, погрешностей измерительных средств, установочных мер, температурных деформаций, базирования и т. д.

Выбор точностных характеристик средств измерения зависит от вида контроля, в котором используют измерительное средство. При этом необходимо различать контроль **пассивный**, когда по результатам контроля забраковывают изделия на годные и бракованные или рассортировывают их на селекционные группы, и **активный**, когда по результатам измерения изготавливают детали, а также осуществляют подналадку хода технологической операции.

В первом случае погрешность измерения приводит к приемке части изделий, оцениваемых как находящиеся в предписанном допуске, но по действительным отклонениям, выходящим за его границы и, с другой стороны, к ошибочной забраковке некоторого количества изделий, действительные размеры которых лежат в допуске, но близко к его границам. Неправильную приемку негодных изделий иногда называют ошибкой второго рода или обозначают буквами БГ, что расшифровывается как «брак в годных». Ошибочную забраковку годных изделий называют ошибкой первого рода или же обозначают ГБ, т. е. «годные в браке».

Точность измерительных приборов

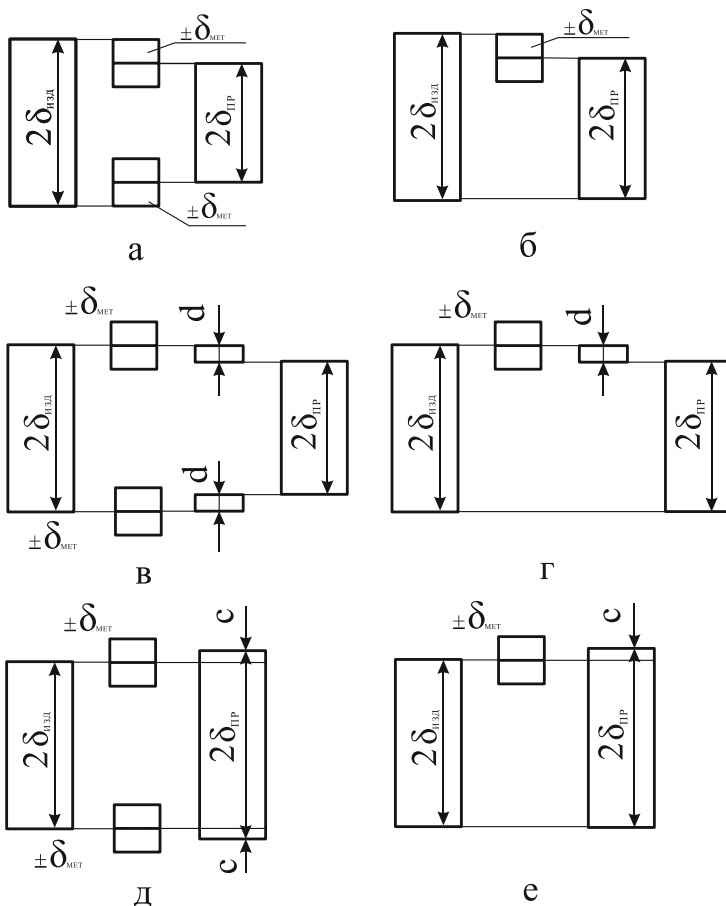


Рис. 43 Варианты назначения приемочного допуска

Во избежание ошибки второго рода необходимо ввести суженный допуск на сортировку, называемый обычно производственным допуском, в результате чего будет полностью устранен риск потребителя в отношении попадания к нему изделий с размерами, выходящими за пределы предписанного допуска. Вместе с тем, производственный допуск значительно увеличивает ошибку первого рода, т. е. повысит риск изготовителя, так как определенная доля годной продукции будет ошибочно признана негодной.

В ряде случаев по условиям эксплуатации допускается незначительный переход некоторого количества изделий за границы предписанного допуска, что ведет как к риску потребителя,

Точность измерительных приборов

так и риску изготовителя. Во всех этих случаях пассивного контроля значение точности измерительных средств выбирают на основе оценки того и другого видов риска, а также значения выхода размеров принятых изделий за сортировочную границу.

Во втором случае при измерении деталей в процессе их изготовления или технологическом контроле погрешность измерения вызывает неправильную наладку процесса изготовления деталей, а следовательно, непосредственно влияет на размеры создаваемых деталей, что приводит к рассеиванию размеров относительно границ допуска и к увеличению доли брака в изготовленной продукции.

30. ДОПУСК ИЗДЕЛИЯ И ПРИЕМОЧНЫЙ ДОПУСК

Возможны различные варианты соотношения между приемочным допуском, по которому отсортировывают негодную продукцию, и допуском, предписанным для изделия. Шесть возможных вариантов назначения приемочного допуска показаны на рисунке 43. Три схемы относятся к случаю возможного выхода размеров деталей как за верхнюю, так и за нижнюю границы поля допуска, а вторые три — к случаю возможности выхода размеров только за верхнюю границу поля допуска, что характерно для существенно положительных величин (биение, погрешность формы, несоосность и т. д.). На рисунке 43, а и б показано, что приемочный допуск сокращен по отношению к предписанному допуску изделия с обеих сторон или с -одной стороны на практически всю предельную погрешность измерения $\pm\delta_{\text{мет}}$. В этом случае имеется полная уверенность, что к потребителю не сможет попасть изделие с отклонениями, превосходящими допустимые, так как риск потребителя равен нулю.

Более экономичными и технически оправданными являются случаи (рис. 43, е, г). Здесь предписанные допуски сокращаются на величину $2c'$ или c' , учитывающую возможные выходы размеров деталей за границы приемочного допуска при приемке неточными измерительными средствами. В этом случае практически риск потребителя также равен нулю, а риск изготовителя значительно меньше, чем при работе по схемам, изображенным на рис. 43, а, б.

На рис. 43, д, е показаны случаи, когда границы приемочного допуска совпадают с предписанными границами допуска изделия, т. е. не введено сужение приемочного допуска. Подобное положение может быть принято изготовителем, если конструктором изделия на основе оценки значения возможных выходов с размеров ошибочно принятых деталей определена полная работоспособность этих экземпляров. Это означает, что влияние погрешности измерения учтено выбором класса точности и поля допуска детали.

Вариант введения производственного допуска, когда нормируемые предельные отклонения размера смещаются внутрь допуска, т. е. вводится производственный допуск, также предусматривается стандартом. При этом значение смещения у каждой приемочной границы принимают равным c' — вероятностному предельному значению выхода размера за каждую границу у

Точность измерительных приборов

неправильно принятых деталей. Если оно конкретно неизвестно, то оно не должно превышать половины нормируемой в стандарте допускаемой погрешности измерения (см. рис. 43, в,г). Этот вариант считается менее предпочтительным, поскольку вносит определенные трудности при оформлении технических документов и приводит к бракованию части годной продукции.

Во всех рассмотренных случаях на основе вероятностных расчетов определяют: количество t неправильно принятых деталей в долях или в процентах общего числа проверенных, количеством неправильно забракованных деталей в долях или в процентах также общего числа деталей и значение s выхода размеров принятых деталей за границу предписанного допуска.

31. ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗБРАКОВКИ (ПАССИВНЫЙ КОНТРОЛЬ)

Для выяснения влияния погрешностей измерения на результаты разбраковки контролируемой продукции примем, что априорно известны законы распределения погрешностей измерения. Для вывода примем, что закон технологического рассеивания контролируемых элементов является нормальным с практической зоной рассеивания $2 \delta_{\text{тех}}$ и соответственно со средним квадратическим отклонением $\delta_{\text{тех}}$ (рис. 44). Поле допуска изделия ограничено значением $2\delta_{\text{изд}} = \Delta_{\text{изд}}$, причем середина поля допуска совпадает с центром группирования технологического рассеивания и $\delta_{\text{изд}} < \delta_{\text{тех}}$, т. е. имеется симметричный выход отклонений деталей за обе границы поля допуска. При рассмотрении примем также, что погрешность метода измерения не имеет систематической составляющей, подчиняется закону нормального распределения и характеризуется практически предельной величиной $\pm \delta_{\text{мет}}$ и $\sigma_{\text{мет}}$. Кроме того, используем понятие о коэффициенте точности метода $1/\text{мет}$, под которым будем понимать отношение практически предельной погрешности измерения $\delta_{\text{мет}}$ ко всему допуску изделия $2 \delta_{\text{изд}}$:

$$A_{\text{мет}} = \frac{\delta_{\text{мет}}}{\Delta_{\text{изд}}} \quad \text{или} \quad A_{\text{мет}(\sigma)} = \frac{\sigma_{\text{мет}}}{\Delta_{\text{изд}}}$$

При контроле изделия отсортировывают детали, размеры которых по результатам измерения укладываются в границы допуска.

Все детали, размеры которых не укладываются в поле допуска, отбраковывают.

Точность измерительных приборов

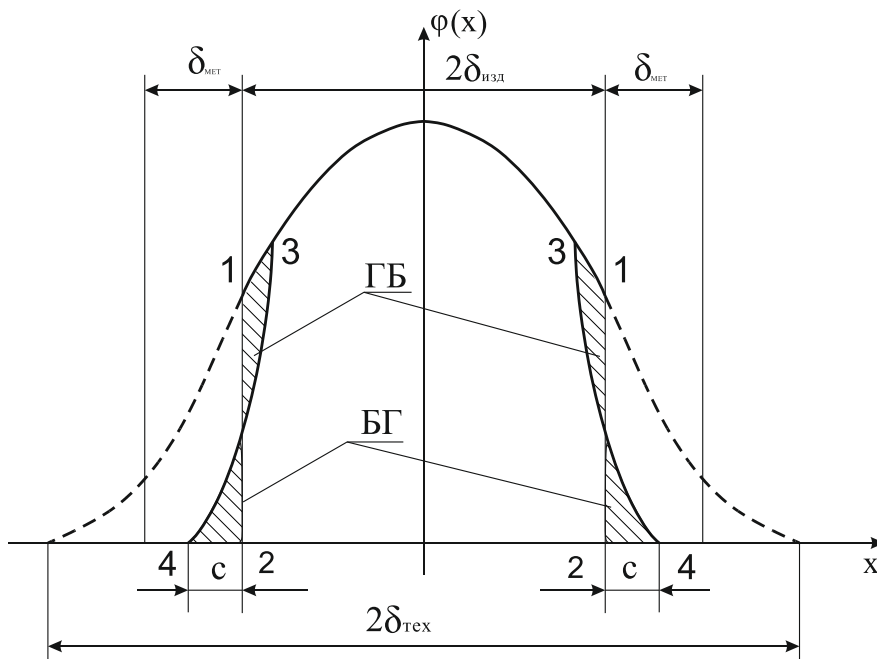


Рис. 44. График отбраковки деталей

Очевидно, что результаты измерения неточно отражают действительный контролируемый размер, поэтому в нашем случае представляет интерес лишь выяснение различия в приемке деталей при применении метода измерения, обладающего погрешностью измерения, и абсолютно точного метода измерения.

Неточность измерения вызовет приемку части деталей, которые лежат за обеими границами допуска ($\text{Б}\Gamma$), и забраковку части деталей, размеры которых примыкают к границам допуска, но лежат в допуске ($\Gamma\text{Б}$). При отбраковке деталей абсолютно точными средствами кривая рассеивания действительных размеров годных деталей выражалась бы нормальной кривой, резко обрывающейся на границах поля допуска (вертикальные линии 1—2 на рис. 1.34). При неточных измерениях эта кривая несколько изменится у каждой границы допуска, практически не изменяясь в средней части допуска (криволинейные наклонные линии 3—4).

Для точностной оценки рассматриваемого метода измерения необходимо найти зависимость между коэффициентом точности метода $A_{\text{мет}}$, значением возможного перехода размеров приня-

Точность измерительных приборов

тых деталей за каждую границу допуска с и вероятностью этого перехода за обе границы поля допуска t , а также вероятностью неправильной забраковки деталей около обеих границ поля допуска p .

Определение требуемых показателей результатов разбраковки следует рассматривать как сложное событие, состоящее из двух простых. Для этого необходимо установить вероятность появления контролируемых деталей в определенных зонах распределения, примыкающих к границе допуска, и вероятность погрешностей измерения (с обратным знаком), равных или превосходящих отклонения размеров относительно границы допуска.

Вероятность появления деталей, лежащих в границах допуска, т. е. таких, которые будут приняты с помощью абсолютно точных измерительных средств, выражается величиной $2\Phi(z)$, где $z = \delta_{\text{изд}}/\sigma_{\text{тех}}$. Вероятность появления бракованных деталей в зоне $\delta_{\text{мет}}$ для обеих границ определится из выражения $2[\Phi(z') - \Phi(z)]$,

где безразмерный параметр для расширенной зоны

$$z' = \frac{\delta_{\text{изд}} + \delta_{\text{мет}}}{\sigma_{\text{тех}}}$$

При приемке деталей с помощью измерительных средств, имеющих погрешность $\pm\delta_{\text{мет}}$, будут приняты не все детали, имеющиеся в этой зоне, а только некоторая их часть t . Это произойдет вследствие того, что на участках $\delta_{\text{мет}}$ будет действовать сложный закон распределения, определяющийся как законом 1 рассеивания размеров деталей на этом участке, так и законом 2 распределения случайных погрешностей измерения.

Точность измерительных приборов

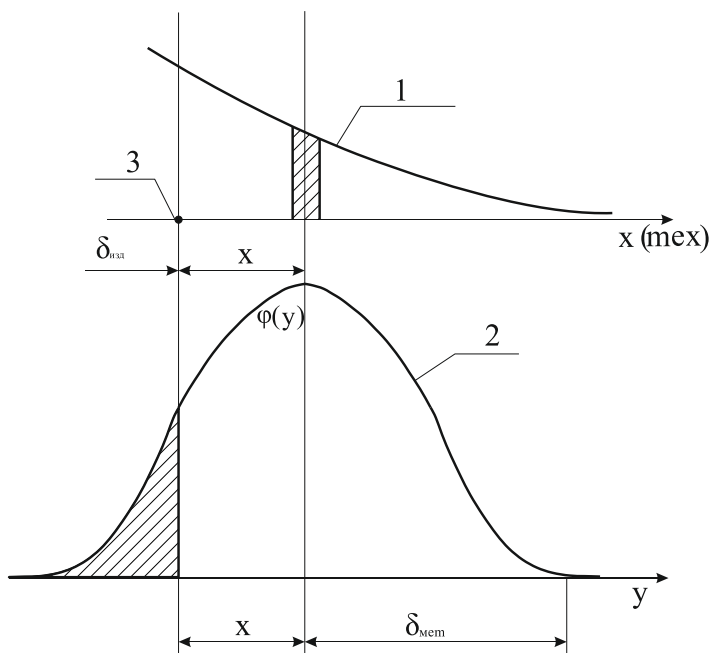


Рис. 45 Проверка бракованных деталей

При проверке этих бракованных деталей с размерами за границей допуска 3 каждое отклонение (рис. 45), выходящее за границу допуска, будет признано по результатам измерения, находящимся в допуске, если случайная погрешность измерения будет равна или больше по абсолютному значению этого отклонения и будет иметь противоположный знак.

Вероятность таких отклонений будет выражаться через произведение плотности вероятности $[\varphi(x)]$ на вероятность погрешности измерения больше чем $-x$, т. е. $[\int_{-x}^{-\infty} \varphi(y) dy] q$,

тогда $\varphi(x) = \varphi(x) \sum_{-x}^{-\infty} \varphi(y) dy$,
где

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma_{\text{тех}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\delta_{\text{изд}} + x)^2}{2\sigma_{\text{тех}}^2}};$$

$$\varphi(y) = \frac{1}{\sigma_{\text{мет}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_{\text{мет}}^2}};$$

Точность измерительных приборов

Полная вероятность приемки деталей, выходящих за обе границы допуска, будет равна интегралу от $\varphi(u)$, т. е.

$$2 \int_x^{\infty} \frac{1}{\sigma_{\text{тех}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\delta_{\text{изд}} + x)^2}{2\sigma_{\text{тех}}^2}} \left[\int_{-x}^{-\infty} \frac{1}{\sigma_{\text{мет}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_{\text{мет}}^2}} dx \right] dx =$$

Полная вероятность приемки этих же деталей, но отнесенная только к принятым экземплярам, будет несколько больше и может быть определена через нормирующий множитель $1/2\Phi(z)$.

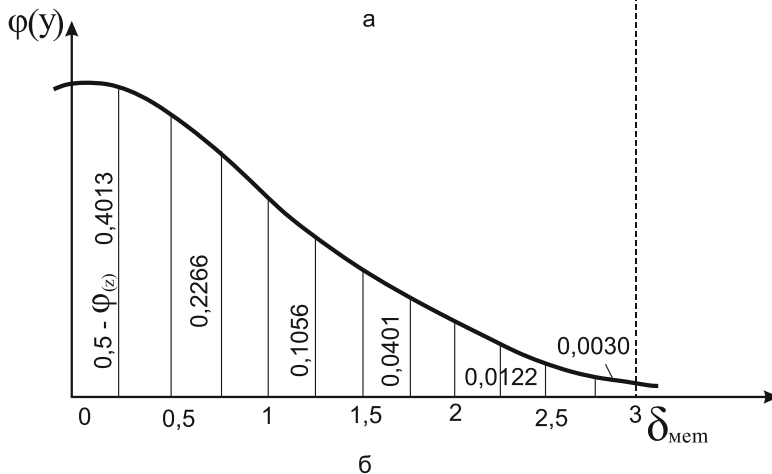
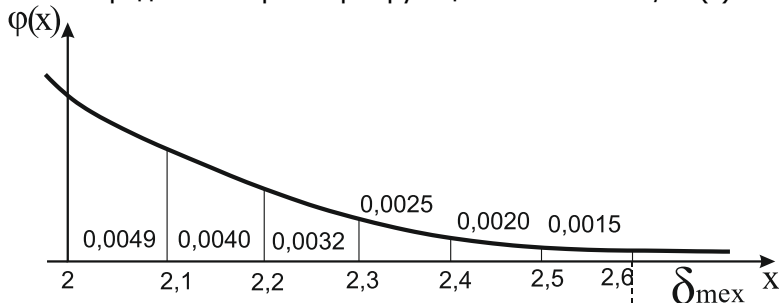


Рис. 46 Метод численного интегрирования

В рассмотренном случае теоретическое значение выхода размеров деталей за границы поля допуска принято равным бесконечности. Практическое же значение выхода размеров деталей с за каждую границу допуска может быть выявлено при принятии какого-либо, практического значения вероятности $2\Phi(u)_{\text{пр}}$,

Точность измерительных приборов

меньшего, чем полная вероятность $2\Phi(u)$, т. е. при отбрасывании случаев, имеющих исчезающе малую вероятность.

Непосредственное вычисление по полученному выражению $t = 2\Phi(u)_{\text{пр}}$ вероятности неправильной приемки деталей, размеры которых находятся за границами допуска, (представляет большие трудности. Значительно проще значения t и s находить методом численного интегрирования, используя таблицы функции $\Phi(z)$ и перемножая и суммируя возможные варианты. На рис. 1.36 показан пример для $z=2$ и $A_{\text{мет}} = 0,15$.

Аналогичным образом может быть написано выражение для вероятности p неправильной забраковки деталей, лежащих в допуске.

32. ПАССИВНЫЙ КОНТРОЛЬ РАЗМЕРОВ, РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПО НОРМАЛЬНОМУ ЗАКОНУ

На основе изложенных положений были рассчитаны значения и построены графики для t , p и s в случае, когда технологическое рассеивание измеряемых размеров подчиняется закону нормального распределения и погрешность измерения также соответствует закону нормального распределения. В дальнейшем графики были рассчитаны Н. Н. Марковым и П. А. Сацердотовым также и для случая, когда распределение отклонений контролируемых размеров следует нормальному закону, а распределение погрешностей измерения — закону равной вероятности.

При сравнении графиков для определения величин t , p и s в случаях, когда погрешность измерения подчиняется закону нормального распределения и закону равной вероятности, т. е. практически двум крайним законам, охватывающим все возможные случаи для случайных погрешностей измерения, было установлено, что при равных значениях отношений $\sigma_{\text{мет}}/\Delta_{\text{изд}}$ результаты разбраковки будут весьма близки независимо от закона распределения погрешности измерения. Следовательно, погрешность измерения целесообразнее оценивать не по предельному значению, а по среднему квадратическому отклонению погрешности измерения. Влияние погрешностей измерения деталей на значения t , p и s будут почти одинаковы при условии, что $\sigma_{\text{мет}} \cdot \sigma_{\text{норм}} = \sigma_{\text{изм}} \cdot \sigma_{\text{рав}}$, и расхождение не будет превышать 10—15% определяемого значения.

Отсюда следует вывод, что при контроле с помощью автоматических средств, когда погрешность измерения подчиняется закону равной вероятности ($\sigma_{\text{мет}} = 1,73\sigma_{\text{мет}}$), предельная погрешность измерения должна быть примерно в 2 раза меньше, чем при ручном контроле при погрешности, подчиняющейся нормальному закону распределения ($\sigma_{\text{мет}} = 1,73\sigma_{\text{мет}}$) для получения тех же значений.

Точность измерительных приборов

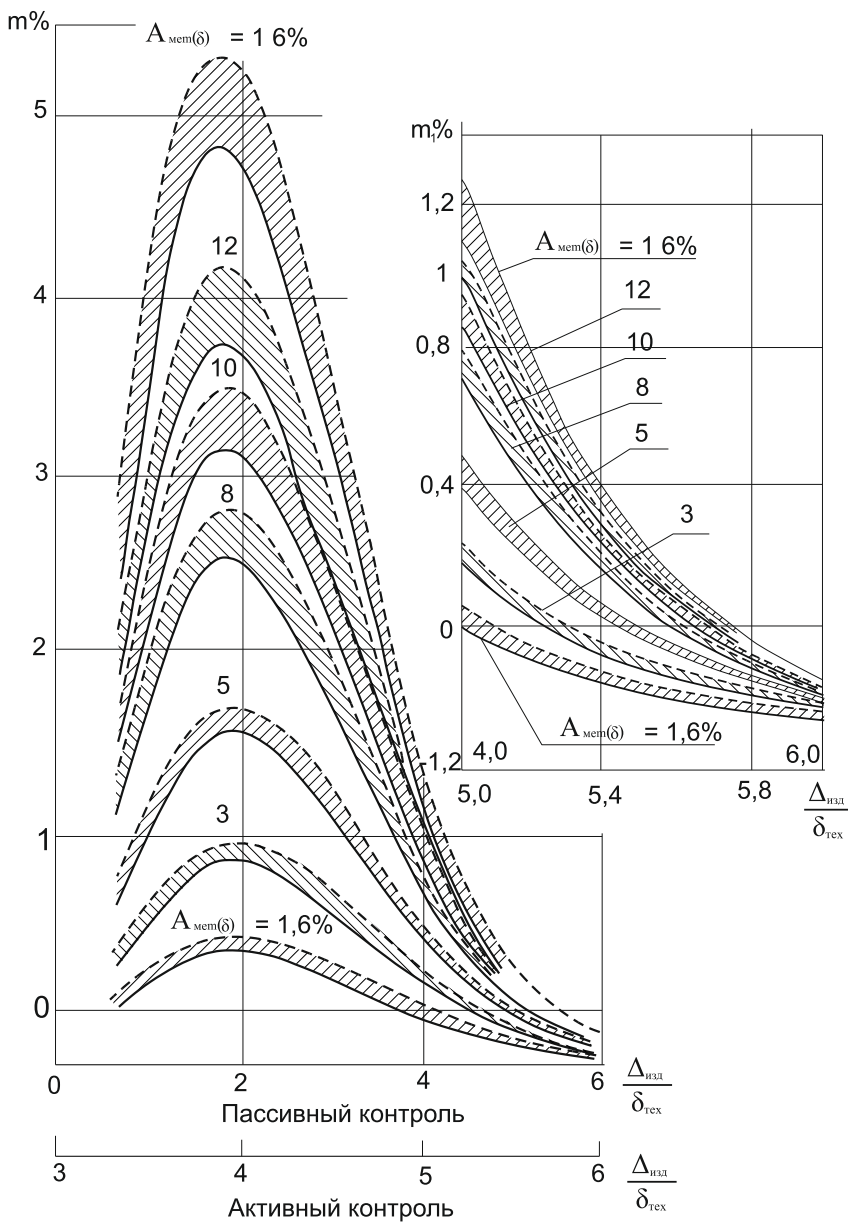


Рис. 47. Графики пассивного и активного контролей

Точность измерительных приборов

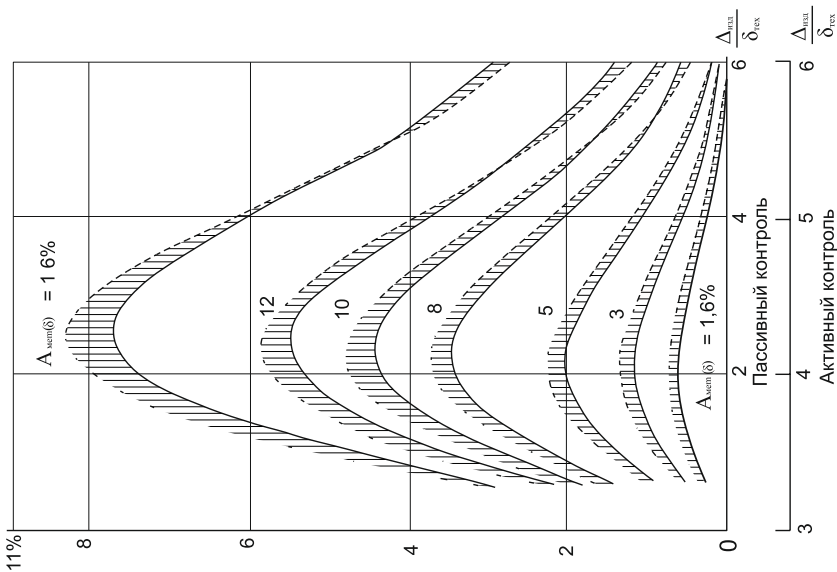
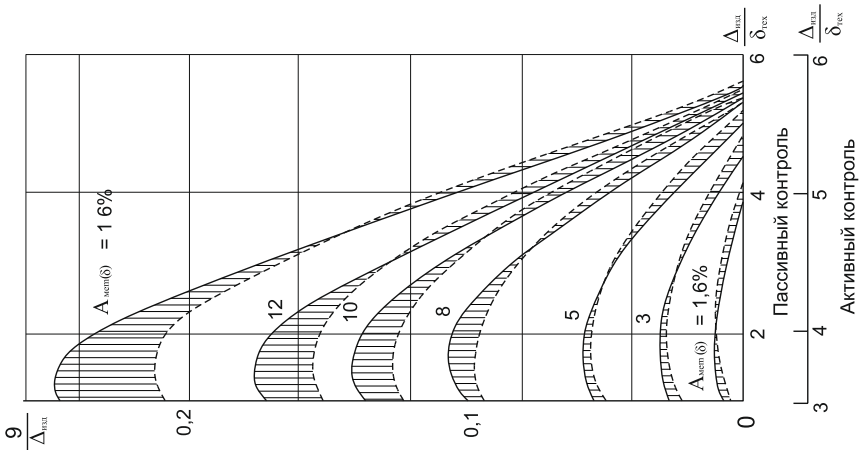


Рис. 48 и 49

Точность измерительных приборов

На рис. 47, 48 и 49 приведены графики для определения величин t , p и s для случая технологического распределения, подчиняющегося закону нормального распределения (сплошные линии) в зависимости от соотношения допуска изделий $\Delta_{\text{изд}} = 2 \delta_{\text{изд}}$ к среднему квадратическому технологического рассеивания $\delta_{\text{тех}}$ и для различных значений $A_{\text{мет}(\sigma)} = \sigma_{\text{мет}} / 2\delta_{\text{изд}}$.

При каждом значении $A_{\text{мет}(\sigma)}$ показан некоторый интервал значений t , p и s , в котором сплошная линия соответствует распределению погрешностей измерения по закону нормального распределения, а штриховая линия по закону равной вероятности.

Графики построены при значениях $A_{\text{мет}(\sigma)} = \sigma_{\text{мет}} / \Delta_{\text{изд}}$, равных 1,6; 3; 5; 8; 10; 12 и 16%. Значения коэффициента точности метода $A_{\text{мет}} = \delta_{\text{мет}} / \Delta_{\text{изд}}$ для $\delta_{\text{мет}} = 3\sigma_{\text{мет}}$; $2\sigma_{\text{мет}}$ и $1,73 \sigma_{\text{мет}}$ приведены в табл. 7.

Таблица 7

Погрешность метода	Коэффициент точности $A_{\text{мет}}$ в зависимости от $A_{\text{мет}(\sigma)}$ %						
	1,6	3	5	8	10	12	16
	5	9	15	24	30	36	48
$\pm \delta_{\text{мет}} = 3\sigma_{\text{мет}}$	3	6	10	16	20	24	32
$\pm \delta_{\text{мет}} = 3\sigma_{\text{мет}}$	3	5	9	14	17	20	20
$\pm \delta_{\text{мет}} = 3\sigma_{\text{мет}}$							

Графики для определения t , p и s рассчитаны из условия совмещения центра группирования технологического рассеивания и середины поля допуска и отсутствия систематических погрешностей измерения. Значения тип вычислены по отношению к общему числу проверенных, а не принятых деталей; тис определены при принятом риске, равном 0,27%, что обычно условно принимается для закона нормального распределения, когда практическая зона рассеивания ограничивается значением 3σ . Для других законов распределения или других границ нормального закона это условие взято лишь по аналогии.

Для графика t (47) при другом проценте риска следует сместить точку нуля. График величин s (рис. 49) при изменении процента риска должен быть рассчитан снова, так как его значение вызывает не только смещение оси абсцисс, но и искажение кривых.

Точность измерительных приборов

В связи с полученными графиками целесообразно остановиться на основных случаях выбора точности измерения при пассивном контроле, когда распределение размеров деталей подчиняется нормальному закону распределения.

1-й случай

Центр группирования совпадает с серединой поля допуска. Для этого случая можно непосредственно воспользоваться графиками при известных: характеристике $\sigma_{\text{тех}}$ технологического рассеивания контролируемых размеров, распределяющихся по закону нормального рассеивания; случайной составляющей погрешности измерения, характеризующейся средним квадратическим отклонением $\sigma_{\text{мет}}$ и законе распределения. При этих показателях из рис. 47 находим t — вероятность приемки негодных деталей; из рис. 48 p — вероятность забраковки годных деталей и из рис. 49 — величины $\frac{c}{\Delta_{\text{изд}}}$ выхода размеров неправильно принятых деталей за каждую границу поля допуска в долях от всего допуска.

Пример 32.1. Если $\Delta_{\text{изд}} = 4\sigma_{\text{тех}}$, коэффициент точности метода измерения

$$A_{\text{мет}} = \frac{\delta_{\text{мет}}}{\Delta_{\text{изд}}} = 0,15, \text{ т. е. при законе нормального распределения погрешностей измерения } \sigma_{\text{мет}}/\Delta_{\text{изд}} = 0,05, \text{ поэтому } m = 0,4\%, p = 1,1\% \text{ и } c = 0,028.$$

Как видно из рис. 48, 49, все кривые имеют экстремальные значения, в связи с чем, если при предварительных расчетах неизвестно соотношение между допуском изделия и характеристикой технологического рассеивания $\Delta_{\text{изд}}/\sigma_{\text{тех}}$, то можно значения t , p и c определить по наибольшему возможному значению $\Delta_{\text{изд}}/\sigma_{\text{тех}}$ при данном $A_{\text{мет}}(\sigma)$

Из анализа графиков можно принять примерные соотношения для предельных значений t , p и c при законах нормального распределения размеров деталей, нормального распределения погрешностей измерения и равной вероятности распределения погрешностей измерения.

2-й случай

Центр группирования технологического рассеивания смещен относительно середины поля допуска. В случае, когда тех-

Точность измерительных приборов

нологическое рассеивание подчиняется закону нормального распределения, но центр группирования смещен относительно середины поля допуска или преднамеренно при настройке производственного процесса, или же вследствие влияния систематических погрешностей при обработке, то значения t , p и c могут быть также найдены по рис. 47 — 49, но с учетом имеющегося смещения. При этом следует учесть, что наличие смещения центра группирования относительно середины поля допуска приводит к неравенству значений возможного выхода за каждую границу допуска. Поэтому неточности разбраковки определяют отдельно по каждой границе поля допуска.

Таблица 8

$A_{\text{изд}} (a) \%$	Предельные значения параметров разбраковки при законах распределения измеряемых размеров x				$c/\Delta_{\text{изд}}$
	нормальный (рис. 1.37 и 1.38)		существенно положительных величин (рис. 1.40, 1.41)		
	$t, \%$	$p, \%$	$t, \%$	$p, \%$	
1,6	0,37—0,39	0,7—0,75	0,15—0,25	0,4—0,5	0,01
3	0,87—0,90	1,2—1,3	0,6—0,7	0,7—0,9	0,03
5	1,6—1,7	2,0—2,25	1,2—1,25	1,5—1,53	0,06
8	2,6—2,8	3,4—3,7	1,9—2,2	2,4—2,8	0,10
10	3,1—3,5	4,5—4,75	2,5—2,75	3,2—3,8	0,14
12	3,75—4,1	5,4—5,8	3,0—3,25	3,55—4,2	0,17
16	5,0—5,4	7,8—8,25	3,9—4,35	5,2—5,5	0,25

Примечания:

1. Первые значения t и p соответствуют распределению погрешности измерения по нормальному закону; вторые по закону равной вероятности.

2. Предельные параметры разбраковки, указанные в таблице, учитывают влияние случайной составляющей погрешности измерения.

Рассмотрим случай, когда центр группирования смещен к верхней границе поля допуска на величину a_n , т. е. $a_n > 0$. Для определения относительного количества неправильно принятых деталей с размерами больше допускаемых t_v , относительного количества неправильно забракованных деталей, отнесенных в 'брак плюс p_v , и величин выхода неправильно принятых деталей за верхнюю границу допуска c_v находят значения t , p и c из гра-

Точность измерительных приборов

фиков при значениях по оси абсцисс ($\Delta_{изд} - 2a_n$): $\sigma_{тех}$ и принимают $m_v = m/2$, $m_n = m/2$ и $c_v = c$. Таким же образом находят значения t , p и c из графиков для нижней границы при абсциссе ($\Delta_{изд} + 2a_n$): $\sigma_{тех}$ и также принимают $t_n = -t/2$, $p_n = p/2$ и $c_n = c$. Общее значение t и p соответственно для обеих границ

$$m = m_v + m_n ; n = n_v + n_n.$$

3-й случай

Вводят уменьшенный допуск на приемку из условия $m=0$. Если по условиям работы деталей назначенный на их изготовление допуск должен быть гарантированным (практически не допускается, чтобы в числе годных встречались детали, имеющие размеры, выходящие, хотя бы и незначительно, за границы поля допуска), то приемочные границы необходимо сместить на величину c' . Эту величину можно определить методом постепенных приближений по графику, показанному на рис. 1.39. Для этого по известному соотношению $\Delta_{изд}/\sigma_{тех}$ при заданной величине коэффициента точности контроля $A_{мет}$ или $A_{мет(\sigma)}$ находят по графику (рис. 49) значение $c/\Delta_{изд}$, которое обозначим $c_1/\Delta_{изд}$. Затем предполагают, что допуск изделия составляет величину $\Delta_{изд}$ ($1 - \frac{2c_1}{\Delta_{изд}}$).

По соотношению $\frac{\Delta_{изд}}{\sigma_{тех}} (1 - \frac{2c_1}{\Delta_{изд}})$ и $A_{мет(\sigma)}$ вновь находят значение $c/\Delta_{изд}$, которое обозначают через $c_2/\Delta_{изд}$. После этого повторно определяют $\frac{\Delta_{изд}}{\sigma_{тех}} (1 - \frac{2c_2}{\Delta_{изд}})$ и снова по графику находят $c_3/\Delta_{изд}$.

Если $c_2/\Delta_{изд}$ незначительно отличается от $c_3/\Delta_{изд}$, то можно окончательно принять приемочный допуск, равным $\Delta_{пр} = \Delta_{изд} (1 - \frac{2c_2}{\Delta_{изд}})$, где $c' \approx c_3$ — значение смещения приемочной границы относительно границы допуска изделия.

Полное значение n_c неправильно забракованных деталей (%) определяют из соотношения $n_c =$

$$200 \left[\Phi \left(\frac{\Delta_{изд}}{2\sigma_{тех}} \right) - \Phi \left(\frac{\Delta_{пр}}{2\sigma_{тех}} \right) \right] + n - m,$$

где n и m находятся по рис. 48 и 47 и значению

$$\frac{\Delta_{изд}}{\sigma_{тех}} \left(1 - \frac{2c'}{\Delta_{изд}} \right).$$

Точность измерительных приборов

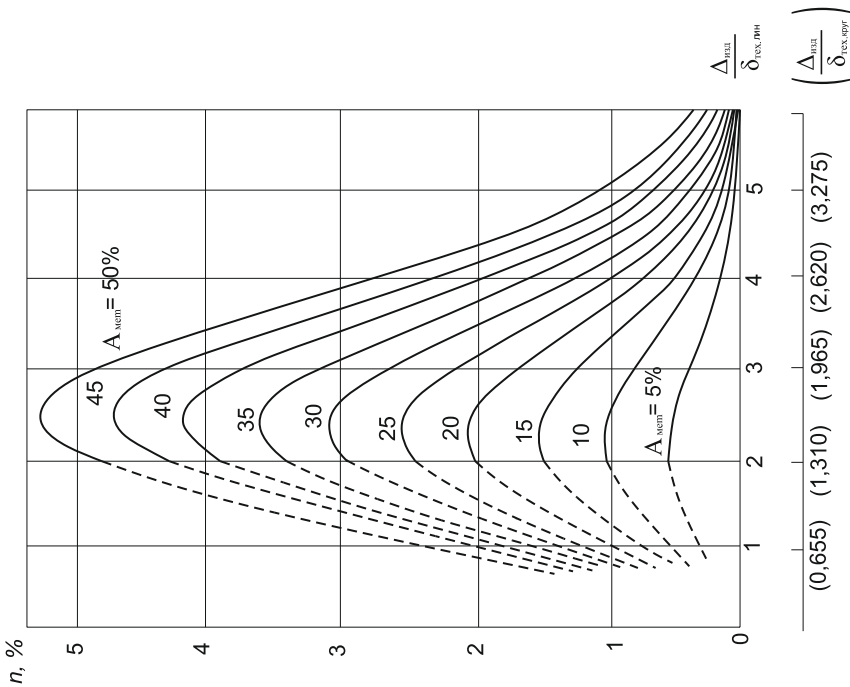


Рис. 50

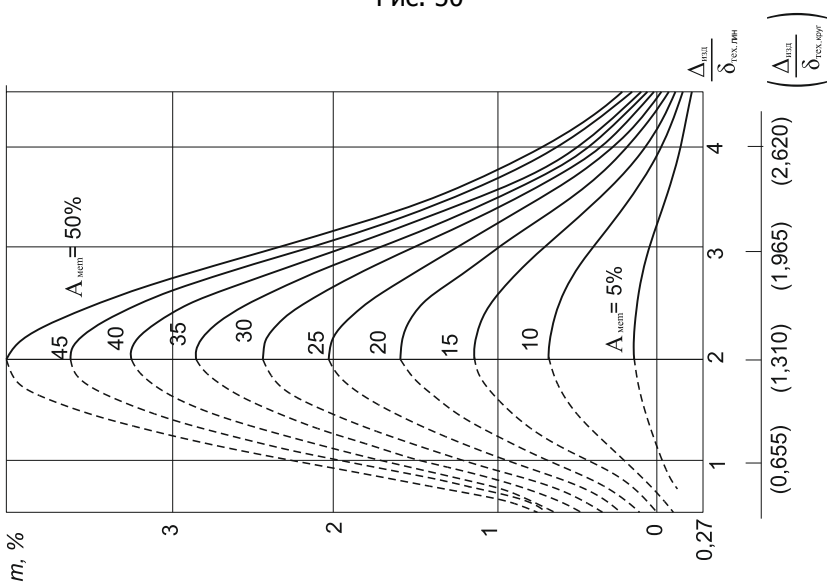


Рис. 51

Пример 32.2. По данным предыдущего примера ($\Delta_{\text{изд}} = 4\sigma_{\text{тех}}$; $A_{\text{мет}} = 0,15$ или $A_{\text{мет}(\sigma)} = 0,05$ при законе нормального рассеивания погрешностей измерения) найти значение c' смещения каждой границы приемочного допуска относительно допуска изделий и вероятность p_c неправильной забраковки годных деталей.

По рис. 49 определяют $c/\Delta_{\text{изд}} = 0,028$, откуда по значению $\frac{\Delta_{\text{изд}}}{\sigma_{\text{тех}}}(1 - \frac{2c_1}{\Delta_{\text{изд}}}) = 3,776$ находим по графику $c_2/\Delta_{\text{изд}} = 0,03$. Далее по значению $\frac{\Delta_{\text{изд}}}{\sigma_{\text{тех}}}(1 - \frac{2c_2}{\Delta_{\text{изд}}}) = 4 * 0,94 = 3,76$

определяют по графику $\frac{c_2}{\Delta_{\text{изд}}} = 0,0305$. Поскольку c_2 и c_3 отличаются несущественно, то можно принять $c'/\Delta_{\text{изд}} = 0,0305$ и приемочный допуск

$$\Delta_{\text{пр}} = \Delta_{\text{изд}}(1 - 0,061) = 0,939\Delta_{\text{изд}}$$

При значении $\frac{\Delta_{\text{изд}}}{\sigma_{\text{тех}}} * 0,939 = 3,756$ по рис. 48 $p = 1,25\%$ и по рис. 47 $m = 0,52\%$.

По таблицам функции Лапласа находят $\Phi(t=2) = 0,477$ и $\Phi(t=1,878) = 0,470$. Откуда $p_c = 200(0,477 - 0,470) + 1,25 - 0,52 = 2,13\%$. При приемке деталей по приемочному допуску $\tau_c = 0$.

4-й случай

Контролируемые детали имеют отклонения с рассеиванием по закону нормального распределения и известным $\sigma_{\text{тех}}$, центр группирования совпадает с серединой поля допуска, известны характеристики закона распределения случайных погрешностей измерения, но имеет место систематическая погрешность измерения. Для этого случая возможны два варианта: 1) систематическая погрешность измерения a_n больше или равна предельной случайной погрешности. Здесь задача может быть решена с использованием приведенных графиков; 2) систематическая погрешность меньше случайной погрешности измерения, тогда следует использовать метод численного интегрирования.

Первый вариант решают, используя ту же формулу, что в 3-м случае. Если погрешность измерения a_n систематическая со знаком плюс у обеих границ поля допуска, то t и p можно определить по формуле

$$m = \quad =$$

Точность измерительных приборов

200

$$\left[\Phi \left(\frac{\Delta_{\text{изд}}}{2\sigma_{\text{тех}}} + \frac{a_{\text{и}}}{\sigma_{\text{тех}}} \right) - \Phi \left(\frac{\Delta_{\text{изд}}}{2\sigma_{\text{тех}}} \right) \right] + \frac{m_{(\Delta_{\text{изд}}+2a_{\text{и}})}}{2} - \frac{n_{(\Delta_{\text{изд}}+2a_{\text{и}})}}{2}$$

Детали с размерами, больше допустимых, приняты не будут, так как систематическая погрешность измерения больше, чем предельная случайная погрешность.

Количество неправильно забракованных деталей (в %), которые имеются только у верхней границы допуска, определяют из выражения

$$n = \left[\Phi \left(\frac{\Delta_{\text{изд}}}{2\sigma_{\text{тех}}} \right) - \Phi \left(\frac{\Delta_{\text{изд}}}{2\sigma_{\text{тех}}} + \frac{a_{\text{и}}}{\sigma_{\text{тех}}} \right) \right] + \frac{n_{(\Delta_{\text{изд}}-2a_{\text{и}})}}{2} - \frac{m_{(\Delta_{\text{изд}}-2a_{\text{и}})}}{2}$$

где $\Phi \left(\frac{\Delta_{\text{изд}}}{2\sigma_{\text{тех}}} \right)$ и $\Phi \left(\frac{\Delta_{\text{изд}}}{2\sigma_{\text{тех}}} + \frac{a_{\text{и}}}{\sigma_{\text{тех}}} \right)$ – значения интегральной функции при номинальных и смещённых границах допуска; $m_{(\Delta_{\text{изд}}+2a_{\text{и}})}$, $m_{(\Delta_{\text{изд}}-2a_{\text{и}})}$, $n_{(\Delta_{\text{изд}}+2a_{\text{и}})}$, $n_{(\Delta_{\text{изд}}-2a_{\text{и}})}$ – неправильно принятые и неправильно забракованные детали при смещённых границах поля допуска, %.

Значения выхода размеров за границу поля допуска у неправильно принятых деталей равны сумме значений выхода, соответствующих смещённым границам поля допуска и систематической погрешности измерения $s = c_{(\Delta_{\text{изд}}+2a_{\text{и}})} + a_{\text{и}}$.

Указанные зависимости для t , n и s даны только для одной границы поля допуска.

33. АКТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ РАЗМЕРОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПО МЕТОДУ ПРОБНЫХ ПРОХОДОВ

Посредством измерительных средств, обладающих случайными погрешностями измерения, разбраковывают партии изготовленных деталей, следовательно, неточности измерения сказываются только на результатах оценки изделия в смысле признания его годным или негодным.

При активном контроле неточности средств измерения непосредственно сказываются на размере изготавливаемой детали, так как ее обработка заканчивается только после достижения размера, находящегося по результатам измерения в поле допуска. В связи с этим при изготовлении деталей по методу пробных проходов вопрос о выборе точности метода активного контроля имеет свои особенности.

Ввиду трудности получения точного и всеобъемлющего решения для случая активного контроля нами было принято, что в процессе изготовления размеры деталей распределяются по закону нормального распределения, имеющему технологическую зону рассеивания, большую, чем допуск на изготовление. Вследствие этого при измерениях в стадии обработки будут наблюдаться размеры как лежащие в поле допуска, так и выходящие из него со стороны исправимых размеров. В тех случаях, когда по результатам контроля размер оказался лежащим в поле допуска, операция обработки на этом заканчивается. Если же размер оказался вне поля допуска, то деталь дополнительно обрабатывают до получения размера, находящегося в допуске. В последнем случае, при использовании методов контроля с пренебрежимо малой погрешностью, кривая распределения размеров несколько видоизменится за счет деталей, введенных в поле допуска после дополнительной обработки. Это изменение кривой распределения в поле допуска показано на рис. 52 штриховой линией.

Точность измерительных приборов

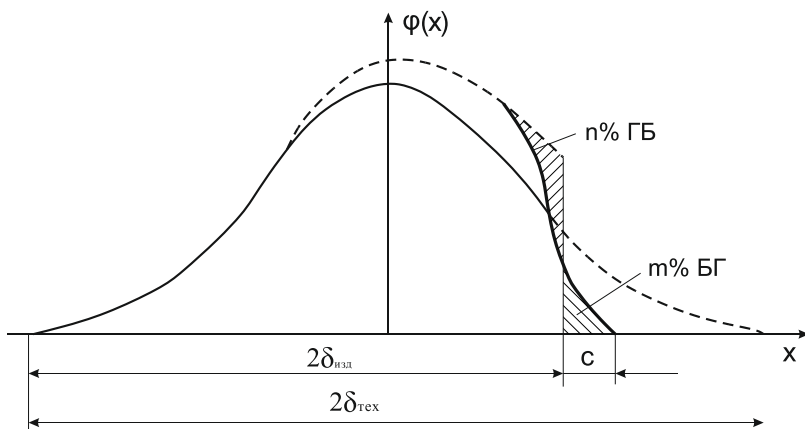


Рис. 52

При применении методов измерения с ощутимой погрешностью, так же как и при сортировке, у границы проходной стороны произойдет некоторое дополнительное искажение кривой распределения действительных размеров деталей. Это изменение кривой распределения будет вызвано прекращением обработки некоторых деталей, действительные размеры которых выходят за поле допуска, но по результатам измерения оцениваемых как годные (БГ). Вместе с тем, это искажение будет создаваться вследствие излишней дополнительной обработки деталей, действительные размеры которых лежат в поле допуска, но оцениваемых как подлежащие дальнейшей обработке из-за погрешностей контроля (ГБ).

Для оценки соответствующих значений τ — процента принятых деталей, которые должны были быть подвергнуты дальнейшей обработке, p — процента годных деталей, но не принятых и повторно обрабатываемых в результате погрешностей измерений, и c — величины выхода размеров принятых деталей за границу поля допуска, можно воспользоваться графиками, показанными на рис. 47—49. Использовать эти графики можно только при условии некоторой неточности, связанной с игнорированием видоизменения первоначальной кривой распределения, вызванной повторной обработкой деталей взамен их окончательной отсортировки, что характерно для пассивного контроля. Кроме того, следует учесть, что графики построены для случая совмещения центра технологического рассеивания с серединой поля допуска, т. е. симметричного выхода части деталей за обе границы поля допус-

ка. При активном контроле, как предположили, имеется односторонний выход кривой нормального распределения за одну границу поля допуска, причем безразлично за какую — верхнюю или нижнюю. С учетом этого нами на графиках нанесена вторая шкала $\Delta_{\text{изд}}/\sigma_{\text{тех}}$ для активного контроля.

При пользовании графиками следует принимать во внимание значения $m/2$ и $p/2$ процентов выхода деталей и неправильной забраковки деталей, а не t и p , как это имело место при пассивном контроле.

Рассмотрим несколько примеров:

1. Соотношение между допуском и технологическим рассеиванием характеризуется величиной $\frac{\Delta_{\text{изд}}}{\sigma_{\text{тех}}} = 5,2$. Погрешности измерения подчиняются нормальному закону распределения.

Следует определить коэффициент точности метода, при котором $m=0$ и $s=0$. Для пассивного контроля находим при $\Delta_{\text{изд}}/\sigma_{\text{тех}}=5,2$ по рис. 47, что $t = 0$ (теоретически $m = 0,27$) при $A_{\text{мет}(\sigma)} = 0,08$. Для активного контроля $t = 0$ при $A_{\text{мет}(\sigma)} = 0,028$. В обоих случаях $s = 0$.

2. При $\Delta_{\text{изд}}/(\sigma_{\text{тех}} = 5,2$ найти $A_{\text{мет}(\sigma)}$ и s , если в обоих случаях контроля практический процент выхода деталей может составлять 0,1% и погрешность измерения подчиняется нормальному закону распределения.

Для пассивного контроля по рис. 47 при $m = 0,1$ находим $A_{\text{мет}(\sigma)} = 0,16$ и по рис. 49 $S = 0,25\Delta_{\text{изд}}$.

Для активного контроля по рис. 47 при $m = 0,2$ находим $A_{\text{мет}(\sigma)} = 0,05$ и по рис. 49 $S = 0,018 \Delta_{\text{изд}}$.

Как видно из рассмотренных примеров, те же значения вероятности выхода принятых деталей за границу допуска при пассивном контроле получаются в случае, когда $A_{\text{мет}(\sigma)}$ примерно в 3 раза больше, чем при активном контроле.

Таким образом, наглядно видно, что при контроле в процессе изготовления необходимо применять методы измерения значительно более точные, т. е. имеющие меньшую относительно к допуску погрешность.

34. АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ РАЗМЕРОВ

Для выбора точности автоматических средств контроля применимы рассмотренные выше положения для пассивного контроля при технологическом распределении отклонений, подчиняющемся закону нормального распределения или закону существенно положительных величин.

Однако для контроля с помощью контрольных автоматов имеются и некоторые специфические особенности, рассмотренные М. И. Коченовым. Эти особенности связаны с возможностью при ручном контроле повторной проверки изделия в сомнительных случаях, в совмещении проверки на контрольном автомате нескольких размеров на соответствующих позициях и приемки деталей, годных по всем результатам, и в повторном пропуске через автомат забракованных изделий.

При ручном контроле оператор имеет возможность в сомнительных случаях проверить изделие повторно более тщательно с минимальными дополнительными затратами времени и во многих случаях сразу же принять решение о годности изделия, даже если результаты контроля показывают, что оно несколько выходит за границу допуска. При разбраковке изделия на автоматах результаты измерения не подвергаются анализу, и для автомата нет «сомнительных» случаев, в связи с чем, при прочих равных условиях, сумма $m+n$ показывается большей.

При одновременном контроле на автомате нескольких размеров деталей общая вероятность неправильной приемки деталей, так же как и общая вероятность неправильной забраковки, не равна суммам t_1, t_2, t_3 или p_1, p_2 и p_3 при контроле трех размеров, а будет меньше этих сумм с учетом возможности сочетания двух аналогичных погрешностей в одном изделии.

Общую вероятность M неправильной приемки определяют из выражения $M = 1 - \prod_{i=1}^p (1 - m_i)$,

где m_i — вероятность неправильной приемки по размеру; p — количество контролируемых параметров.

При постоянных малых значениях $m_i = m$ примем $M = mp$.

Общую вероятность N неправильной забраковки деталей находят аналогично.

Так как в некоторых случаях объем неправильно забракованных деталей может оказаться значительным, особенно при сокращенном производственном допуске, то для повышения эф-

Точность измерительных приборов

фактивности работы контрольных автоматов повторно проверяют забракованные изделия на том же автомате.

Многократная перепроверка забракованных изделий без повышения точности измерения основана на использовании положения, что поскольку приемочный допуск сокращен по сравнению с гарантированным на величину s у каждой границы, то негодные детали не смогут попасть в число принятых, а годные детали, забракованные при одном значении случайной погрешности измерения, будут приняты при другом значении случайной погрешности в процессе повторного измерения.

Эффективность разбраковки изделий резко убывает с увеличением количества повторных пропусков забракованных изделий через автомат. Поэтому, даже в массовом производстве, где повторная проверка не вызывает значительных затруднений, более чем трех-, четырехкратная перепроверка оказывается нецелесообразной.

При использовании контрольных автоматов для сортировки деталей на несколько размерных групп, что имеет место в случаях применения селективной сборки, обычно принимают, что размеры изделий в пределах каждой группы распределяются по закону равной вероятности независимо от закона распределения размеров всех изделий по общему полю допуска на изготовление.

Точность измерительных приборов

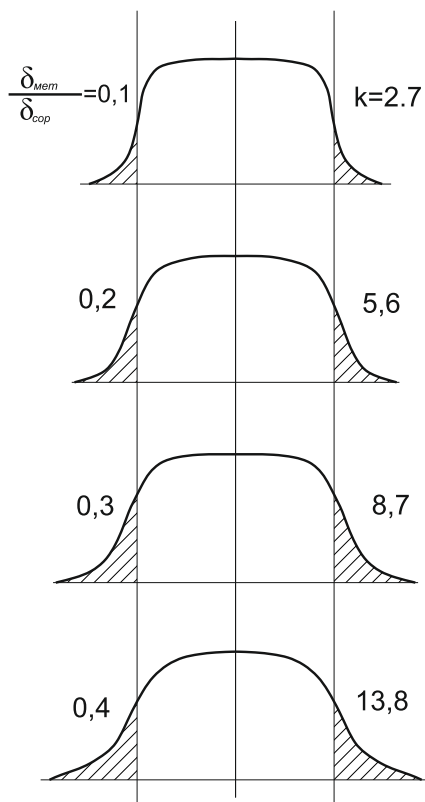


Рис. 53. Кривые распределения действительных размеров изделий

На рис. 53 показаны кривые распределения действительных размеров изделий, попадающих в одну сортировочную группу, а также указано относительное количество изделий k ошибочно отнесенных к данной группе. Для погрешностей контроля принят закон нормального распределения. Как видно из значений, приведенных на рис. 53, количество деталей с размерами, выходящими за пределы сортировочной группы, но ошибочно относимых к данной группе, возрастает в указанных пределах почти прямо пропорционально отношению $\delta_{мет}/2\delta_{сор}$, где $\delta_{сор}$ — допуск сортировочной группы. Вследствие этого к точности сортировочных автоматов предъявляются особо повышенные требования.

35. ЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТОЧНОСТИ КОНТРОЛЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА ПРАКТИКЕ

Ранее нормирование погрешностей контрольных средств встречалось только в системе допусков на изготовление и износ калибров для контроля гладких изделий, а также в виде регламентации предельной погрешности аттестации концевых мер длины.

На рисунке 54 приведены соотношения между допусками на изготовление и износ калибров и допуском изделия, предусмотренные у калибров для гладких изделий по системе допусков и посадок ОСТ и системе ISA. Ломаные линии изображают отношения погрешности измерения калибром к допуску изделия для случаев:

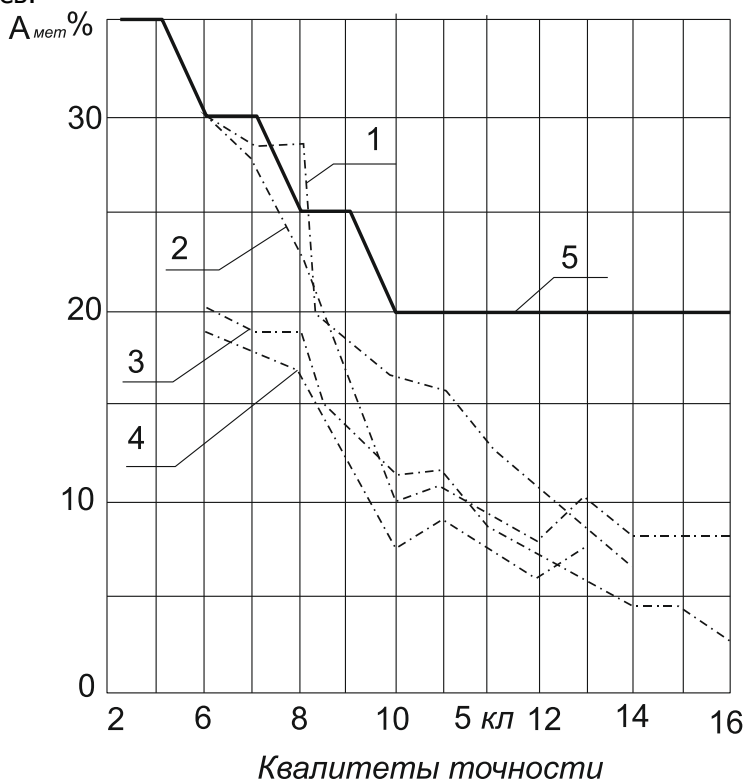


Рис. 54 Соотношения между допусками на изготовление и износ калибров и допуском изделия

Точность измерительных приборов

Очевидно, что для неточностей изготовления деталей должны существовать ступени точности (классы, качества, степени точности), содержащие рационально построенные ряды допусков, возрастающие по мере роста диаметра и выбираемые конструктором, исходя из эксплуатационных требований к машине с учетом технологических возможностей производства деталей. К этим ступеням точности и рядам допусков целесообразно привязать определенные нормы, устанавливающие долю погрешности измерения по отношению ко всему допуску. Значения пределов допускаемых погрешностей измерения $\delta_{мет}$ в долях от допуска контролируемого изделия $\Delta_{изд}$, т. е. $A_{мет}$ показаны на рисунке 54. Они равны:

Квалитет ИСО	Коэффициент точности метода
2-5	35
6-7	30
8-9	25
10-16	20

Как видно из приведенных значений коэффициента точности метода, относительная погрешность измерения уменьшается по мере перехода к более грубым допускам, т. е. более грубые отклонения измеряются относительно точнее, чем весьма малые отклонения. Это кажущееся противоречие становится оправданным, если учесть, что абсолютные погрешности измерения возрастают менее интенсивно, чем относительные величины погрешностей изготовления.

Для всех измерительных средств указан температурный режим при их использовании. При этом под понятием температурный режим подразумеваются все условия, которые влияют на температурные деформации. Температурный режим включает источники погрешности, связанные с деформациями, возникающими от разности температур объекта измерения, прибора или настроечной меры, коэффициентов их линейного расширения, колебания температуры помещения в процессе измерения и отклонений температуры от 20°C .

Приведенные погрешности измерения были исследованы Бюро взаимозаменяемости Министерства станкоинструментальной промышленности СССР при разработке руководящих материалов как на основе экспериментов и производственных наблюдений, так и расчетным путем.

Точность измерительных приборов

При выборе соответствующего измерительного средства должно быть соблюдено условие, что предельная погрешность измерения не должна превышать допускаемую погрешность $[\delta_{\text{мет}}] > A_{\text{мет}}\Delta_{\text{изд}}$, где $\Delta_{\text{изд}}$ — допуск на изготовление контролируемого размера.

36. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ(ПОЛОЖЕНИЯ) ПРИКЛАДНОЙ МЕТРОЛОГИИ

При проведении измерений необходимо стремиться к обеспечению оптимальной точности результата измерений. При этом следует помнить, что низкая точность измерений приводит к получению ошибочной информации о состоянии измеряемого объекта. Необоснованно высокая точность измерения может быть экономически неоправданной. Поэтому при решении вопроса о выборе средств и методов измерений следует помнить следующие основные положения:

I. Средства измерений не должны оказывать влияние на физическое состояние измеряемого объекта (в качестве примера можно привести влияние измерительного усилия средств измерений линейных размеров. Подробнее об этом см. § 1.3).

II. При выборе измерительной базы необходимо исходить из цели измерений и их назначения. Так, при исследовании эксплуатационных параметров объекта в качестве базы для измерений размеров следует принимать эксплуатационную базу. Тогда как при исследовании точности технологического процесса базой измерений должна явиться технологическая база, которая используется при изготовлении измеряемого объекта.

III. Во всех случаях точность относительного (дифференциального) измерения выше точности абсолютного измерения. Поэтому, когда абсолютные измерения не позволяют получить результаты с необходимой точностью, следует перейти к относительным измерениям как одному из способов получения результата измерений с более высокой точностью.

IV. Повышение точности результата измерений может быть достигнуто исключением грубых и систематических погрешностей из результатов измерений и уменьшением влияния случайных погрешностей. При этом во всех случаях грубые погрешности (промахи) следует исключать из результатов измерений. Систематические погрешности следует исключать тогда, когда это обеспечивает заметное повышение точности. Необходимо иметь в виду, что, если принять за результат измерений среднее арифметическое из ряда n -измерений, точность повышается в \sqrt{n} раз.

VI. Неоднородность измеряемого объекта не должна оказывать влияние на результат его измерений. Поэтому путем обработки результатов измерений следует исключить влияние неод-

Точность измерительных приборов

нородности.

VII. Необходимо помнить, что порог чувствительности средств измерений (для меры это будет точность ее аттестации) ограничивает возможная точность результата измерений. Точность результата измерений никогда не может быть выше порога чувствительности средств измерений.

37. ПРЕДМЕТ ТЕОРИИ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Измерительным устройством (ИУ) называется средство измерения, представляющее совокупность: первичных измерительных преобразователей (датчиков), вырабатывающих под действием величины, подаваемой на его вход, сигнал измерительной информации, промежуточных измерительных преобразователей, передающих и преобразующих эту информацию, и измерительного прибора, выдающего сигнал о количественном значении величины в форме, доступной для непосредственного восприятия, обработки или хранения.

Многообразие направлений рассмотрения вопросов точности измерительных устройств, в значительной мере определяющих погрешность измерения, можно отнести к трем стадиям, схематически указанным на рис. 11. 1.

1. Обеспечение точности при проектировании ИУ, при котором решается прямая или обратная задача расчета точности:

Прямая задача точности — синтез ИУ, состоит в оптимизации схемы и параметров ИУ, точностных требований к отдельным составляющим устройствам, узлам, деталям на основе заданной допускаемой выходной погрешности ИУ. Реализация этой задачи представляет большие трудности, так как, исходя из служебного назначения ИУ и его суммарной выходной погрешности, следует решить вопрос о выборе оптимальной схемы ИУ, о номинальных значениях и допускаемых отклонениях параметров большого числа преобразователей (например, для механизмов — о размерах и об отклонениях размеров всех звеньев, погрешностях формы рабочих поверхностей, об отступлениях в относительном расположении этих поверхностей и требованиях в относительном расположении этих поверхностей и требованиях к шероховатости). Прямая задача обычно математически выражается одним уравнением точности, содержащим большое число неизвестных, и решается или методом последовательных приближений, или же путем наложения дополнительных условий. С развитием вычислительной техники эту задачу решают посредством ЭВМ, когда оптимальные параметры устройства находят, например, по методу статистических испытаний, методом Монте-Карло, математическим моделированием.

Точность измерительных приборов

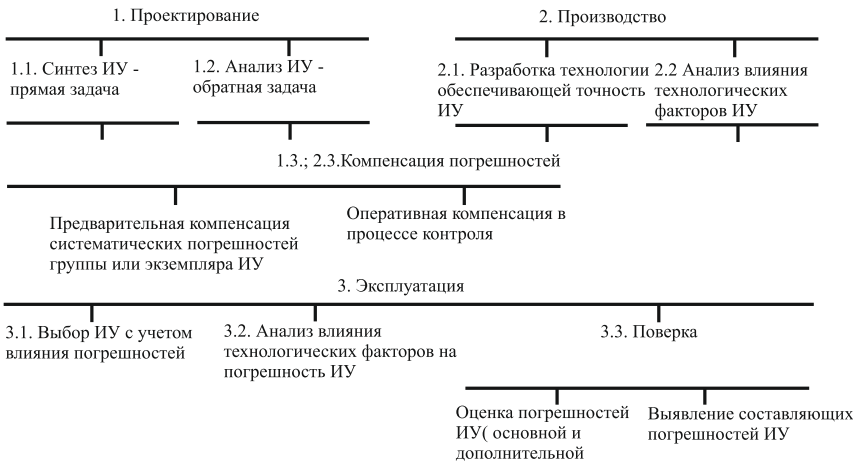


Рис. 55. Метод Монте-Карло

Обратная задача точности — анализ ИУ, заключается в расчете результативной (выходной) точности ИУ на основе разрабатываемых конструктивных чертежей и заданных точностных требований к отдельным звеньям устройства. Эту задачу решают значительно проще, поскольку она сводится к суммированию влияния отдельных составляющих погрешностей и к определению общей выходной неточности, проявляющейся при использовании рассчитываемого ИУ. Исходя из подобного расчета, могут быть обоснованно сформулированы требования к точности ИУ в целом, на основе которых обычно выполняют контрольно-приемочные испытания. Точностной расчет помогает целесообразно откорректировать требования к отдельным составляющим устройствам и узлам прибора, исходя из учета воздействия отдельных погрешностей на суммарную (выходную) погрешность ИУ. Могут быть также решены вопросы о целесообразности применения метода групповой или полной взаимозаменяемости, о необходимости введения компенсаторов и об их числе, о выборе регулируемых звеньев. При этом выясняется наиболее рациональный способ регулирования устройства, его чувствительность и необходимые пределы. Обратную задачу также можно выполнять на ЭЦВМ.

Изучение методов решения прямой и обратной задачи расчета точности ИУ является предметом теории точности ИУ.

2. Технологический аспект изучения вопросов точности ИУ, относящийся к сфере производства, в основном сводится к двум направлениям:

Точность измерительных приборов

1) разработке технологического процесса, обеспечивающего заданную точность ИУ при соблюдении необходимой производительности и основных экономических показателей, т. е. к синтезированию технологии изготовления ИУ, и 2) к анализу влияния различных технологических факторов на погрешности изготовления отдельных составляющих ИУ и к управлению технологическими операциями обработки и сборки, с целью достижения оптимальной точности узлов и частей ИУ.

Эти вопросы являются предметом изучения технологических дисциплин.

3. Эксплуатационные вопросы точности ИУ связаны с обеспечением единообразия и верности средств измерения и объединяют также два основных направления:

1) учет влияния погрешностей ИУ и в целом погрешностей измерения на результаты контроля в отношении неточностей сортировки деталей по группам (годных и бракованных или сортировочным группам), определение величины перехода за границу сортировки, выбор точности ИУ и установление суженых границ для приемочного допуска;

2) анализ влияния эксплуатационных факторов на погрешности ИУ и измерений или, например, влияния изменения температуры, напряжения, электропитания и др.

Эти вопросы являются основными для метрологических дисциплин.

К числу эксплуатационных вопросов точности относятся также проблемы поддержания единства мер и средств измерения и их поверки.

Анализ результатов поверки различных ИУ проводится или с целью оценки основной и дополнительной погрешности ИУ, что является задачей аттестации данного экземпляра измерительного средства или же множества однотипных ИУ, или с целью выявления составляющих погрешностей ИУ для эффективного снижения их влияния на общую выходную погрешность ИУ.

Методы аттестации точности ИУ и способы анализа результатов поверки ИУ (гармонический, дисперсионный, корреляционный и другие виды анализов) обычно входят в разделы практической метрологии.

Следует также выделить некоторые вопросы, являющиеся общими для рассмотренных стадий создания прибора. К ним относится вопрос компенсаций. Компенсация погрешностей, могущих проявиться в процессе использования ИУ, ставит сво-

Точность измерительных приборов

ей задачей разработку методов и средств уменьшения или полного устранения систематических выходных погрешностей множества однотипных ИУ или конкретного экземпляра путем предварительного введения в устройство компенсатора на основе анализа результатов испытания прибора или же текущих выходных погрешностей ИУ, выявляющихся в процессе контроля путем адаптивной оперативной их компенсации.

Вопросы компенсации погрешностей ИУ изучаются как в разделах дисциплины «Метрология», так и в курсах по изучению конкретных видов ИУ. В курсе «Теории точности измерительных устройств» рассматриваются теоретические основы решения двух сформулированных выше задач расчета точности.

Наличие теоретических основ точностного расчета и раскрытие закономерностей в области обеспечения точности ИУ дают возможность решать проблемы достижения выходной точности различных приборов и машин на основе инженерных расчетов. Последние, в свою очередь, создают условия наиболее экономического достижения точности машин или, другими словами, являются одним из важных средств дальнейшего увеличения производительности труда. Таким образом, внедрение в практику приборостроения и машиностроения методов исследования точности ИУ на стадии их проектирования и обработки позволяет вскрыть и мобилизовать громадные дополнительные резервы в промышленности для повышения качества машин, обеспечения стабильности их эксплуатационных показателей, дальнейшего увеличения производительности труда, сокращения трудоемкости и сроков освоения выпуска новых машин и приборов.

38. РАЗВИТИЕ НАУКИ О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

При проектировании новых механизмов агрегатов, станков, машин и т. д. в первую очередь устанавливают схему всего устройства и производят кинематический расчет, на основе которого определяют основные кинематические параметры или на основе расчета электрической схемы устанавливают номиналы всех элементов.

Во второй стадии проектирования для механических систем выполняют силовой и прочностной расчет, позволяющий выбрать необходимые размеры деталей и их материал, обеспечивающие прочность и жесткость конструкции и долговечность ее работы.

Для большинства конструкций необходимо проводить также и точностной расчет, с помощью которого обеспечивают заданную точность работы всего устройства.

В работах советских ученых установлены теоретические основы науки о точности, разработаны основные закономерности и на основе их созданы методы расчета допусков и точностных требований к деталям, узлам и измерительным устройствам (ИУ).

Развитие учения о точности устройств связано с автоматизацией многих процессов, увеличением скоростей работы машин и повышением требований к их эксплуатационной точности.

Теорию точности ИУ широко применяют при расчете различных устройств.

Во многих отраслях народного хозяйства можно найти бесконечное число примеров, где одним из основных расчетов является точностной. Достаточно привести такие примеры из области станкостроения, как точностной расчет копировальных, винторезных, зубообрабатывающих и автоматических станков, где вопросы точности наряду с производительностью и надежностью играют первостепенную роль.

В области измерительной техники трудно представить случай конструирования измерительного прибора без выполнения точностного расчета, поскольку от прибора требуется практически полное отсутствие действия погрешностей. Учет влияния погрешностей обработки, жесткости и износа деталей важен и для высокоскоростных механизмов, у которых динамические процессы в сильной мере зависят от наличия неточностей. Особенно существенно это для механизмов, в которых теоретически предусматривается установившееся равномерное движение.

Точность измерительных приборов

Невольно может возникнуть вопрос, как же создавались высокоточные приборы, существовавшие до развития науки о точности ИУ? На это можно ответить так. Если проследить историю создания любого прибора, то станет ясно, что при его конструировании также проводили точностные расчеты, но выполняли их без единых методов и разработанных приемов, что значительно затрудняло выполнение расчетов, а из-за приближенности и неполноты расчетов требовался длительный срок для освоения производства прибора.

Многие великие русские ученые — Д. И. Менделеев, П. Л. Чебышев при решении практических задач занимались точностными вопросами. Но только трудами советских ученых наука о точности механизмов оформилась в самостоятельную науку со своими принципами, методами и приемами. В марте 1951 г. происходила творческая дискуссия, обсуждавшая пути развития науки о точности механизмов. Дискуссия показала, что в то время недостаточно были разработаны вопросы учета динамических явлений, возникающих в быстроходных машинах из-за погрешностей изготовления; в работах некоторых школ нет достаточной связи методов расчета точности механизмов с технологией изготовления и сборки деталей; чрезмерное значение придается случайным погрешностям и вероятностным методам расчета. С другой стороны, при расчете точности механизмов не применяется теория случайных процессов, выполнение расчетов оказывается весьма сложным. Все эти недостатки постепенно устраняются в последующих работах советских ученых.

Современная теория точности механизмов базируется на теории механизмов и машин, технологии, метрологии, теории погрешностей и математической статистике.

1. Характеристика средства измерения, под которой понимается зависимость, между значениями величин на выходе и входе средства измерения, т. е. функция, связывающая сигнал на выходе измерительного устройства с вызывающим его сигналом на входе $S_{\text{вых}} = \varphi(S_{\text{вх}})$.

2. Коэффициент преобразования измерительного преобразователя — отношение сигнала на выходе измерительного преобразователя, отображающего измеряемую величину, к вызывающему его сигналу на входе преобразователя $S_{\text{вых}} / S_{\text{вх}}$. В тех случаях, когда характеристика линейна и коэффициент преобразования постоянен, преобразователь называют также усилителем (электронным, пневматическим, гидравлическим и т.

Точность измерительных приборов

д.).

При линейности характеристики коэффициент преобразования равен номинальному значению чувствительности $k_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{ВЫД}}}{S_{\text{ВХ}}} = \frac{\varphi(S_{\text{ВХ}})}{S_{\text{ВХ}}} = \text{const}$ или $\varphi(S_{\text{ВХ}}) = k_{\text{ном}} S_{\text{ВХ}}$

3. Чувствительность измерительного прибора — отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины $k = \frac{dS_{\text{ВЫД}}}{dS_{\text{ВХ}}}$ или при

конечных приращениях $k = \frac{\Delta I}{\Delta x}$

где ΔI — изменение сигнала на выходе; Δx — изменение измеряемой величины.

Для приборов, снабженных шкалой, чувствительность k определяется как отношение длины деления a шкалы прибора к цене, деления c . Например, чувствительность k манометрического прибора при цене деления $c = 0,5$ ат и длине деления $a = 5$ мм равна $5/0,5 = 10$ мм/ат.

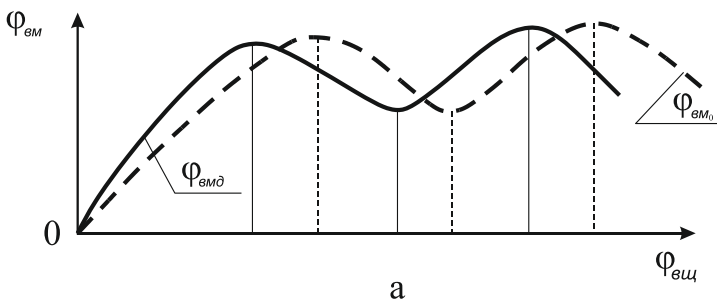
Для шкальных приборов, предназначенных для линейных измерений, понятие о чувствительности совпадает с понятием линейного передаточного отношения, которое является безразмерной величиной.

Для миниметра с ценой деления $c = 0,001$ мм и длиной деления $a = 1$ мм чувствительность и линейное передаточное отношение: $k = i^* = \frac{1}{0,001} = 1000$

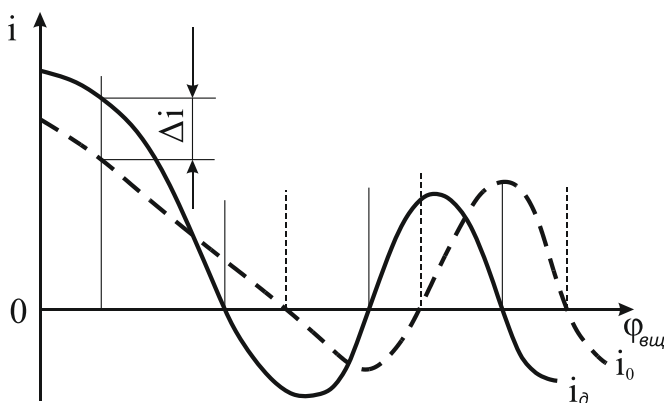
Для приборов, основанных на механическом принципе действия взамен понятия о чувствительности применяют обычно понятие о передаточном отношении.

Передаточное отношение (угловое) — отношение мгновенных угловых скоростей или угловых перемещений ведомого и ведущего звеньев механизма.

Точность измерительных приборов



а



б

Рис. 56. Изменения угла поворота ведомого звена

На рис. 56, а, б показан график изменения угла поворота ведомого звена $\varphi_{вм}$ в зависимости от угла поворота ведущего звена $\varphi_{вщ}$ ($\varphi_{вмо}$ — функция угла поворота для точного механизма, $\varphi_{вмд}$ — для действительного). Первая производная этой функции; изображенная на графике рис. 11.2,б, представляет собой изменение передаточного отношения механизма по углу поворота ведущего звена (i_o — для точного механизма, i_d — для действительного):

$$i = \frac{\omega_{вм}}{\omega_{вщ}} = \frac{d\varphi_{вм}}{d\varphi_{вщ}}. \quad 40$$

Линейное передаточное отношение — отношение мгновенных линейных скоростей или линейных перемещений ведомого и ведущего звеньев механизма:

Точность измерительных приборов

$$i^* = \frac{u_{вм}}{u_{вщ}} = \frac{dS_{вм}}{dS_{вщ}}. \quad (41)$$

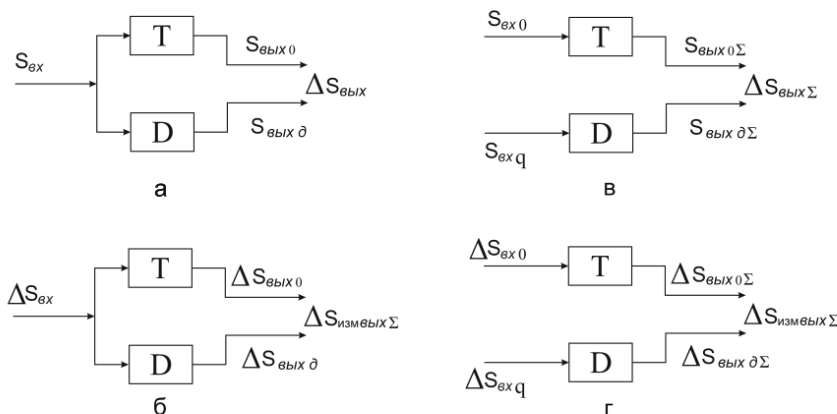


Рис. 57 Линейное передаточное отношение

Линейное передаточное отношение может быть связано с угловым передаточным отношением, исходя из следующего. Если радиусы рассматриваемых точек ведущего и ведомого звеньев обозначить через $r_{вщ}$ и $r_{вм}$ соответственно, то

$$U_{вм} = \omega_{вм} r_{вм} \text{ и } U_{вщ} = \omega_{вщ} r_{вщ} \quad (42)$$

т. е. линейное передаточное отношение равно угловому передаточному отношению, умноженному на отношение крайних радиусов (ведомого к ведущему).

4. Погрешность преобразователя по выходу— разность между значениями величин на выходе действительного и соответствующего теоретического преобразователя при одинаковых значениях на входе $\Delta S_{ввых} = S_{ввых д} - S_{ввых 0}$

Под действительным преобразователем понимается реально выполненный преобразователь (датчик, прибор), который вследствие принятой схемы и неточностей изготовления, а также монтажа имеет ряд погрешностей, поэтому выходная функция $S_{ввых д}$ отличается от теоретически требующейся $S_{ввых д} \neq \varphi_0(S_{вх})$.

В противоположность этому под теоретическим преобразователем подразумевается прототип действительного преобразователя, отличающийся отсутствием каких-либо отклонений в схе-

Точность измерительных приборов

ме, в параметрах и форме звеньев. Выходная функция теоретического преобразователя $S_{\text{вых}0}$ точно соответствует теоретически требуемым закономерностям $S_{\text{вых}0} = \varphi_0(S_{\text{вх}})$.

Для приборов, использующих механический принцип действия, применяется термин «погрешность положения механизма».

Рассмотрим в качестве примера центральный кривошипно-шатунный механизм, в котором кривошип AB имеет длину $l + \Delta l$, отличающуюся от длины l звена AB теоретического механизма.

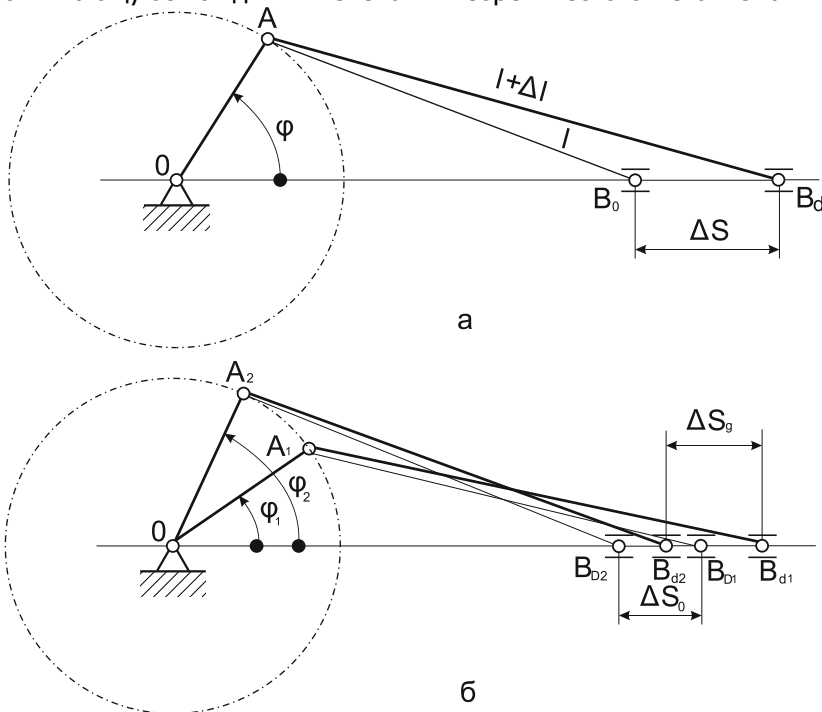


Рис. 58

Если мы наложим действительный механизм на теоретический (рис. 11.4, а), поставив ведущее звено (кривошип OA) в одно и то же угловое положение, то ведомое звено (ползушка) действительного механизма окажется в точке B_d , а у теоретического механизма — в точке B_0 . Разница в положениях ведомых звеньев ΔS и есть погрешность положения механизма.

5. Погрешность изменения преобразователя по выходу — разность изменения значений величин на выходе действительного и соответствующего теоретического преобразователя при

Точность измерительных приборов

одинаковых изменениях на входе.

$$\Delta S_{\text{изм.вых}} = \Delta S_{\text{вых.д}} - \Delta S_{\text{вых.0}}$$

Для приборов, основанных на механическом принципе действия, соответственно применяется термин «погрешность перемещения механизма».

Для рассматриваемого примера при повороте кривошипа из положения φ_1 (рис. 11.4,6) в положение φ_2 точка В действительного механизма переместится из положения $V_{д1}$ в положение $V_{д2}$, а та же точка теоретического механизма будет занимать, соответственно, положение V_{01} и V_{02} .

Таким образом, перемещение ведомого звена действительного механизма равно $\Delta S_{д}$, а теоретического ΔS_0 . Разность этих перемещений и есть погрешность перемещения механизма $\Delta S_{\text{пер}} = \Delta S_{д} - \Delta S_0$

Точность преобразователя характеризуется либо погрешностью преобразователя по выходу (погрешностью положения механизма), либо же погрешностями изменения преобразователя по выходу (погрешностями перемещения механизма).

Причем использование того или другого показателя зависит от условий применения прибора.

Обычно различают два метода измерения — метод непосредственной оценки и дифференциальный. Для метода непосредственной оценки, когда показания прибора непосредственно соответствуют измеряемой величине, точность работы прибора характеризуется погрешностью преобразователя по выходу (погрешностью положения механизма). При дифференциальных методах измерения погрешности работы прибора определяются погрешностью изменения преобразователя по выходу (погрешностью перемещения механизма).

Если рассматривать погрешности показаний таких приборов и инструментов, как штангенциркуль, микрометр, вольтметр, часы и т. д., т. е. приборов, используемых для непосредственных методов измерений, то можно обнаружить, что эти погрешности характеризуются погрешностью положения отсчетного индекса по отношению к соответствующему штриху шкалы. Следовательно, для этих приборов должны находить погрешность преобразователя по выходу или погрешность положения механизма в нескольких характерных точках, расположенных на всем пределе измерений, или же непрерывную функцию погрешности преобразователя по выходу $\Delta S_{\text{вых}}$ в зависимости от измеряемой величины (т. е. входной величины $S_{\text{вх}}$), или показания прибора (т. е. вы-

Точность измерительных приборов

ходной величины $\Delta S_{\text{вых}} = S_{\text{вых.д}} - S_{\text{вых.0}}$), Обычно используемые при точных измерениях кривые поправок отличаются лишь по знаку от рассматриваемых графиков систематических погрешностей преобразователя по выходу.

Для приборов, применяемых для дифференциальных методов измерения, по которым определяют разность показаний при измерении и настройке (или в конце и в начале измерений), например для миниметров, оптиметров, счетчиков расхода, реле времени и т. д., показателем точности является разность между изменением показаний действительного прибора и теоретически точного, т. е. погрешность изменения преобразователя по выходу

$$\Delta S_{\text{изм.вых}} = \Delta S_{\text{вых.д}} - \Delta S_{\text{вых.0}}$$

6. Погрешность по выходу — это разность между значениями величин на выходе действительного и теоретического прибора, возникающая вследствие неточности преобразователя и неточности входной величины $\Delta S_{\text{вых}\Sigma} = \Delta S_{\text{вых.д}\Sigma} - \Delta S_{\text{вых.0}\Sigma}$.

Для ряда счетно-решающих механизмов характерно введение в прибор входных данных, которые в силу многих причин могут быть неточно введены. Например, при определении момента сбрасывания груза должны быть учтены данные о высоте и скорости полета самолета, скорости и направлении ветра. Если эти данные определены неточно, то сигнал о моменте сбрасывания будет подан несвоевременно и погрешность будет определяться не только погрешностями самого счетно-решающего устройства, но и отклонениями входных данных. Таким образом, погрешность по выходу и погрешность преобразователя по выходу отличаются между собой погрешностью входной величины.

Для механических приборов в этом случае применяется термин «погрешность положения ведомого звена», вместо термина «погрешность положения механизма».

7. Погрешность изменения по выходу — это разница изменения значений величин на выходе действительного и теоретического преобразователя, происходящая из-за неточности преобразователя и неточности изменения входных величин $\Delta S_{\text{изм.вых}\Sigma} = \Delta S_{\text{вых.д}\Sigma} - \Delta S_{\text{вых.0}\Sigma}$.

В соответствующих случаях применяется погрешность перемещения ведомого звена.

8. Погрешность чувствительности или передаточного отношения равна разности действительной и теоретической функции чувствительности Δk , передаточного отношения Δi или

линейного передаточного отношения Δi^* :

$$\Delta k = k_d - k_0 \quad (43')$$

$$\Delta i = i_d - i_0 \quad (44')$$

$$\Delta i^* = i_d^* - i_0^* \quad (45')$$

На рис. 11.2, б показаны функции передаточного отношения для действительного и теоретического механизмов и их разность.

9. Коэффициент влияния i . При учете действия первичных погрешностей, имеющих в ИУ, используется понятие о коэффициенте влияния погрешности. Под ним понимается отношение изменения сигнала на выходе ИУ dS к вызывающей его первичной погрешности dq_i

$$i = \frac{dS}{dq_i} \quad (46)$$

Таким образом, погрешности в ИУ, имеющие меньший коэффициент влияния, менее заметно действуют на погрешность ИУ по выходу.

Для ИУ, основанных на механическом принципе действия, коэффициент влияния j совпадает с понятием о передаточном отношении погрешности, если под последним понимается отношение дополнительного перемещения ведомого звена к самой первичной погрешности, если принять, что ею создается ведущее перемещение.

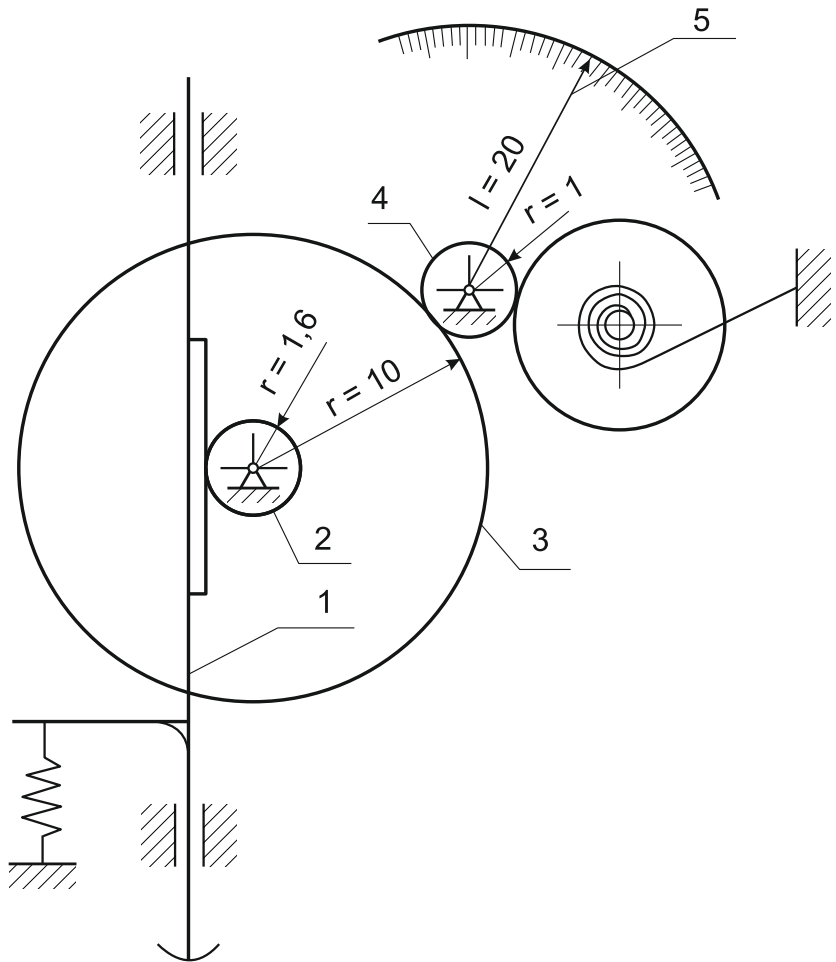


Рис. 59. Схема зубчатого индикатора часового типа

На рисунке 59 дана схема зубчатого индикатора часового типа. Перемещения измерительного стержня 1 передаются на показывающую стрелку 5 через рейку, реечный триб 2, колесо 3 и стрелочный триб 4. Передаточное отношение между колесом 3 и стрелочным трибом 4 равно 10. Погрешность в зацеплении рейки и реечного триба сказывается на линейном перемещении конца стрелки с линейным передаточным отношением

$$i_{15}^* = 10 \frac{20}{1,6} = 125.$$

Точность измерительных приборов

Погрешность в зацеплении колеса 5 и стрелочного триба 4 влияет на перемещение конца стрелки с линейным передаточным отношением $i_{35}^* = 10 \frac{20}{10} = 20$ или $i_{45}^* = 1 \frac{20}{1} = 20$.

Таким образом, видно, что одинаковые погрешности в зацеплении рейки и триба 1—2 оказывают в 6,25 раз большее влияние (125:20) на погрешность преобразователя по выходу, чем погрешность в зацеплении колеса и стрелочного триба 3—4.

39. ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИУ

При проектировании и изготовлении реально создаваемые ИУ могут значительно отличаться от тех идеальных прототипов, которые наилучшим образом решают поставленную задачу измерения. Эти отклонения могут вызываться применением упрощенной схемы прибора, погрешностями изготовления или монтажа, влиянием действующих сил, вызывающих деформацию деталей и контактные деформации, сопротивлениями из-за трения, износом поверхностей и т.д.

Все возможные погрешности, вызывающие неточности работы ИУ, классифицируют по основным причинам, вследствие которых они возникают. Такое разделение позволяет для каждой группы погрешностей применять свои методы выявления влияния этих неточностей на общую погрешность работы ИУ, а также создавать приемы устранения действия, этих неточностей или же уменьшения их влияния.

Исходя из этого целесообразно различать следующие пять групп погрешностей приборов, устанавливаемых с учетом основных причин возникновения погрешностей:

1. Погрешности схемы прибора.
2. Технологические.
3. Динамические.
4. Температурные.
5. Погрешности, изменяющиеся во времени.

При рассмотрении погрешности по выходу необходимо дополнительно учитывать шестую группу — погрешность входных величин. Первая группа погрешностей схемы объединяет погрешности, вызванные применением схемы ИУ, которая лишь приближенно осуществляет заданную характеристику, т. е. связь между функцией выходного сигнала и функцией на входе преобразователя.

Технологические погрешности вызваны неточностью в изготовлении или монтаже элементов ИУ. Обычно все технологические погрешности механических приборов в свою очередь делят на четыре группы:

2.1.1. Погрешности размера, т. е. отклонения действительных расстояний между элементами кинематических пар и отклонения размеров элементов пар от номинальных величин.

2.1.2. Погрешности формы — отклонения форм рабочих поверхностей кинематических пар, которые могут рассматри-

Точность измерительных приборов

ваться как комплексные погрешности, например нецилиндричность, или разделяться на элементарные; овальность, огранку, погрешность профиля; конусообразность, седлообразность, бочкообразность; непрямолинейность, вогнутость, выпуклость, изогнутость; неплоскостность.

2.1.3. Погрешности расположения — отклонения относительного положения рабочих поверхностей звеньев, которые обычно делятся на: непараллельность и перекося; перпендикулярность, непересечение; радиальное биение и несоосность; торцовое биение; (неперпендикулярность плоскости оси).

2.1.4. Шероховатость поверхности и волнистость.

Технологические погрешности для электрических цепей относят к следующим группам:

2.2.1. Погрешности изготовления: погрешности сопротивлений; погрешности емкостей; погрешности индуктивностей.

2.2.2. Погрешности, связанные с монтажом: дополнительные сопротивления или проводимости, дополнительные емкости, дополнительные индуктивности и взаимоиנדуктивности.

Динамические погрешности (3-я группа), возникновение которых вызвано проявлением инерционных сил, действующих в приборе. К ним относятся деформации, связанные с жесткостью деталей прибора, в том числе контактные и упругие деформации, проявление сил трения, воздействие динамических явлений, например, ударно-колебательного процесса, вибраций, неравномерности.

Температурные погрешности — это погрешности, вызванные изменением температурных условий работы прибора, вследствие которых изменяются реально действующие физические параметры и коэффициент влияния, из-за чего возникает дополнительная погрешность.

Погрешности, изменяющиеся во времени (5-я группа), связаны с изменением параметров элементов приборов с течением времени. Сюда относятся снижение упругости, износ деталей и вызываемое этим изменение размеров элементов кинематических пар, потеря эмиссии электронными приборами, изменение сопротивлений или емкостей. Многие из этих причин объединяются понятием старение, а другие — износом.

Проектируемое ИУ должно обладать «запасом точности», обеспечивающим работоспособность прибора после заданного срока эксплуатации. Например, при приемке ряда приборов на заводе-изготовителе предусматривается запас точности

Точность измерительных приборов

40—50% предельной погрешности, т. е. нормы приемки ужесточаются в 1,6—2,0 раза по сравнению со стандартами.

В некоторых случаях предусматриваются две нормы точности: на приемку нового прибора и на допускаемую погрешность к концу срока эксплуатации.

При конструировании механических приборов в целях упрощения их изготовления, устранения влияния зазоров и т. д. малые поступательные перемещения отдельных точек заменяются качанием их вокруг неподвижной оси или колебанием системы на плоских пружинах. Различные шарнирные механизмы заменяются сочленениями ножей с призмами; взамен зубчатых и фрикционных передач, дающих номинально постоянное передаточное отношение, применяют рычажные передачи, состоящие из плоскостей и сфер и т. д.

В цепях механизмов, которые должны иметь постоянное передаточное отношение, нередко применяют поводковые и шарнирные механизмы, создающие переменное передаточное отношение даже при малых углах поворота звеньев.

С подобными же явлениями встречаются при проектировании некоторых измерительных ИУ, основанных на пневматических, электрических и других принципах работы. В большинстве случаев измеряемое в ИУ на выходе изменение давления воздуха, его расхода, электроемкости, индуктивности и т. п. лишь с некоторым приближением характеризуется линейной зависимостью от изменения контролируемой величины. Поскольку шкалу прибора выполняют обычно равномерной, то отступление закономерности, реализуемой прибором от линейной зависимости, также создает некоторую погрешность, зависящую от выбранной схемы ИУ.

Все эти упрощения и изменения схемы ИУ приводят к изменению схемы, лишь приближенно осуществляющей требуемый закон преобразования входной величины в выходной сигнал, вследствие чего возникает погрешность, часто называемая погрешностью схемы ИУ. Вместе с тем упрощенная схема обычно имеет меньшее число звеньев и содержит более простые элементы, благодаря чему облегчается изготовление прибора. Применение «приближенной» схемы ИУ приводит к значительному технико-экономическому эффекту, поскольку уменьшается трудоемкость, упрощается технология изготовления деталей и сборки ИУ и одновременно повышается точность изготовления звеньев прибора. С другой стороны, по-

Точность измерительных приборов

ющего упрощенную схему, оказывается, меньше, чем прибора с точной, но сложной схемой. Это связано с тем, что небольшая систематическая погрешность ИУ, вызванная применением приближенной схемы, значительно перекрывается уменьшением технологических погрешностей из-за сокращения схемы и упрощения форм деталей.

Для погрешности схемы характерно то, что она для каждого значения величины на входе преобразователя (или положения ведущего звена) имеет вполне определенное значение, т. е. эта погрешность является систематической постоянной или же изменяющейся по определенному закону (детерминированной величиной или функцией).

Погрешность ИУ, вызванная отступлением реальной схемы от схемы, точно осуществляющей заданный закон преобразования, можно определять аналитическим путем. Лишь в некоторых случаях, когда процессы, происходящие в ИУ, недостаточно изучены, может применяться экспериментальный метод определения погрешности схемы ИУ.

40. АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ СХЕМЫ ИУ

Этот метод заключается в сопоставлении непрерывной функции изменения выходного сигнала схематизированного ИУ с подобной же функцией, для теоретического ИУ. Таким образом, сравнивают функции, связывающие изменение выходного сигнала с входной величиной при выбранной схеме ИУ и теоретическом средстве, которое обеспечивает получение необходимой характеристики (обычно линейной). Затем находят функцию, выражающую разность между выходными сигналами схематизированного и теоретического ИУ как функцию изменения входной величины. Эта разность и соответствует искомой погрешности схемы ИУ.

Таким образом, погрешность схемы:

$$\Delta S_{сх} = S_{сх} - S_{е}, \quad (47)$$

где $S_{сх}$ — изменение выходного сигнала схематизированного ИУ; $S_{е}$ — изменение выходного сигнала теоретического ИУ.

Найденная по формуле (47) погрешность схемы прибора в виде уравнения, выражающего дефектное изменение выходного сигнала в функции изменения входной величины, для измерительного показывающего прибора характеризует избыточное или недостаточное перемещение отсчетного указателя, например, стрелки прибора. Поскольку для показывающего измерительного прибора представляет интерес погрешность показаний прибора, выраженная в измеряемых величинах, то для ее определения надо найденное значение или функцию погрешности на выходе разделить на чувствительность прибора k или номинальное его значение $k_{ном}$.

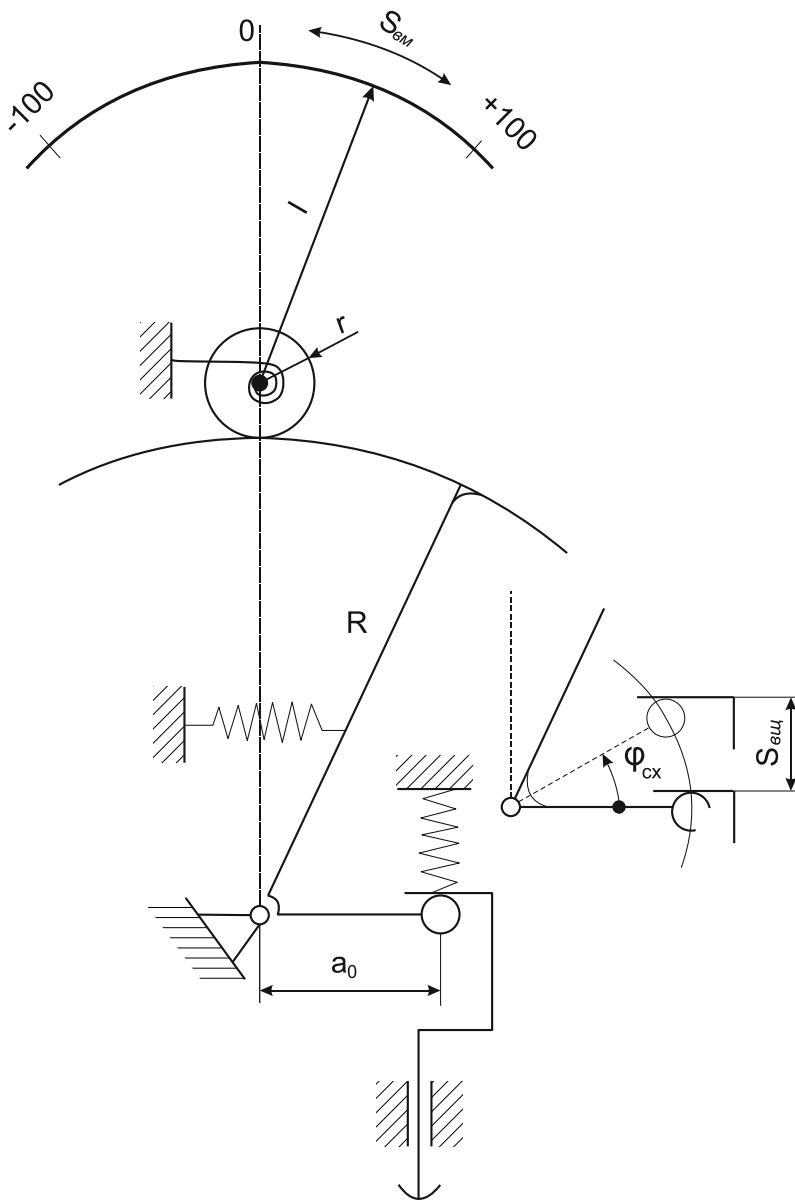


Рис. 60 Схема рычажного зубчатого прибора
Тогда погрешность схемы ИУ на входе, выраженная в измеряемых величинах,

Точность измерительных приборов

$$\Delta S_{\text{сх.изм}} = \frac{\Delta S_{\text{сх}}}{k} \quad (48)$$

Рассмотрим несколько примеров определения погрешности схемы механизма.

Пример 40.1. Определить погрешность схемы рычажного зубчатого прибора. Размеры звеньев в мм: $l=60$; $r=1$; $R = 90, 75$; $a_0=5,5$. Цена деления $c=0,001$ мм; пределы измерения $\pm 0,1$ мм.

Примем следующие обозначения:

$S_{\text{вщ}}$ — перемещение измерительного наконечника от среднего (начального) положения механизма; $S_{\text{вм}}$ — линейное перемещение стрелки от нулевого штриха шкалы; φ — угол поворота рычага, вызванный перемещением $S_{\text{вщ}}$.

Закон движения для схемы механизма

$$S_{\text{вм.сх}} = \varphi_{\text{сх}} \frac{Rl}{r} \quad (a)$$

где

$$\sin \varphi_{\text{сх}} = \frac{S_{\text{вщ}}}{a} \quad (б)$$

вследствие чего, подобный механизм называется «синусным механизмом». , Закон движения теоретического механизма

$$S_{\text{вм}} = \frac{Rl}{r} \varphi \quad (в)$$

где при равномерной шкале

$$\varphi = \frac{S_{\text{вщ}}}{a_0} \quad (г)$$

Разложим значения синуса в ряд

$$\sin \varphi_{\text{сх}} = \varphi_{\text{сх}} - \frac{\varphi_{\text{сх}}^3}{3!} + \frac{\varphi_{\text{сх}}^5}{5!} \quad (д)$$

В дальнейшем рассмотрении ограничимся лишь первыми двумя членами разложения. Приравняв формулы (б) и (г) при $a=a_0$ и подставив их в выражение (д), найдем

$$\varphi_{\text{сх}} = \varphi_{\text{сх}} - \frac{\varphi_{\text{сх}}^3}{6!} \quad (е)$$

Погрешность схемы механизма согласно выражению 48:

$$\Delta S_{\text{сх}} = \varphi_{\text{сх}} \frac{Rl}{r} - \left(\varphi_{\text{сх}} - \frac{\varphi_{\text{сх}}^3}{6!} \right) \frac{Rl}{r}$$

После преобразования погрешность положения механизма

$$\Delta S_{\text{сх}} = \frac{\varphi_{\text{сх}}^3}{6!} \frac{Rl}{r} \quad (ж)$$

Точность измерительных приборов

Из уравнений (в) и (г) номинальное линейное передаточное отношение механизма или чувствительность

$$i^* = \frac{S_{вм}}{S_{вщ}} = \frac{Rl}{ar} \quad (3)$$

Погрешность схемы механизма на входе (в измеряемых величинах) будет равна согласно выражению (48)

$$\Delta S_{сх.изм} = \frac{\Delta S_{сх}}{i^*} = \frac{\varphi_{сх}^3}{6!} a \quad (и)$$

Числовое значение погрешности схемы механизма на входе может быть найдено, если выражение (б) подставить $S_{вщ} = 0,1$ мм и $a = 5,5$ мм:

$$\sin \varphi_{сх \max} = \frac{0,1}{5,5} = 0,01818$$

и

$$\Delta S_{сх.изм} = \frac{0,01818^3}{6} 5,5 * 1000 = 0,0056$$

что составляет лишь 1/180 цены деления шкалы, т. е. ничтожно малое значение. Если бы пределы измерения были бы больше и составляли, например, ± 1 мм вместо $\pm 0,1$ мм, то погрешность схемы, как видно из расчетов, возрасла бы в 1000 раз:

$$\sin \varphi_{схшах} = \frac{1}{5,5} = 0,1818; \quad \varphi_{схшах} = 10^\circ 28' 36''$$

и

$$\Delta S_{сх.изм} = \frac{0,1829^3}{6} 5,5 * 1000 = 5,6 \text{ мкм.}$$

В этом случае погрешность схемы будет в 5,6 раза больше цены деления шкалы, что совершенно недопустимо.

Точность измерительных приборов

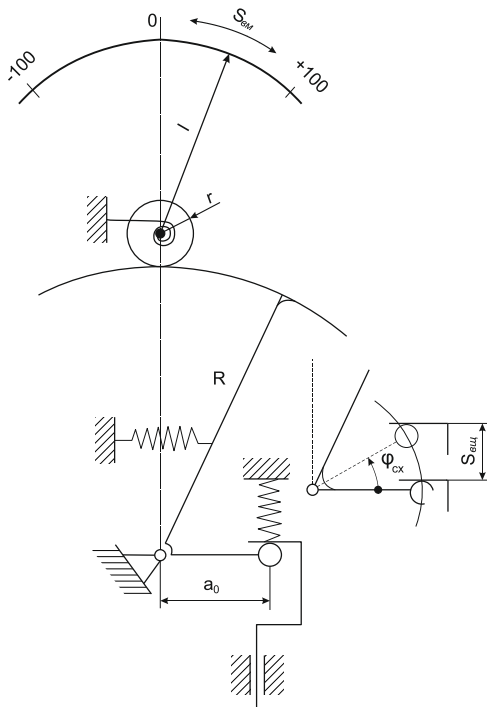


Рис. 61

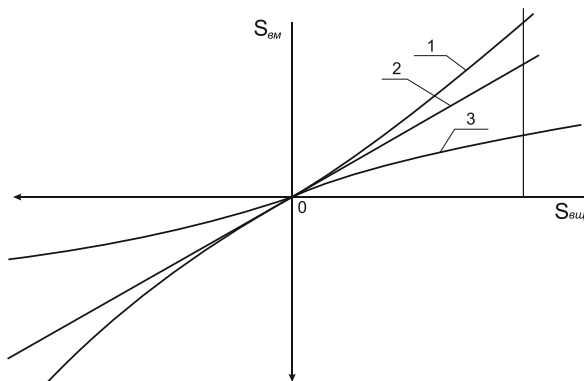


Рис. 62

Точность измерительных приборов

Пример 40.2. Определить погрешность схемы рычажно-зубчатой головки, схема которой приведена на рис. 62. Размеры звеньев такие же, что и в примере 40.1.

Механизм, показанный на рис. 62, отличается от механизма, приведенного на рис. 61, лишь тем, что в нем сфера (шарик) принадлежит измерительному стержню, в то время как на рис. 61 эта сфера была закреплена на конце рычага.

Аналогично предыдущему, уравнения (а), (в) и (г) останутся без изменения. Взамен уравнения (б) можно написать

$$\operatorname{tg}\varphi_{\text{сх}} = \frac{S_{\text{вщ}}}{a} \quad (\text{б}')$$

Рассмотренную схему называют «тангенсным механизмом». При разложении тангенса в ряд получим

$$\operatorname{tg}\varphi_{\text{сх}} = \varphi_{\text{сх}} + \frac{\varphi_{\text{сх}}^3}{3} + \frac{2\varphi_{\text{сх}}^5}{15} \dots \quad (\text{д}')$$

Ограничиваясь лишь двумя первыми членами разложения, найдем, что

$$\varphi_{\text{сх}} = \varphi_{\text{сх}} + \frac{\varphi_{\text{сх}}^3}{3} \quad (\text{е}')$$

откуда погрешность положения механизма

$$\Delta S_{\text{сх}} = -\frac{\varphi_{\text{сх}}^3 R_1}{3 r} \quad (\text{ж}')$$

и погрешность схемы механизма на входе

Из сравнения выражений (и) и (и') видно, что синусный механизм дает положительную погрешность показаний, в то время как тангенсный механизм создает отрицательную погрешность. Кроме того, погрешность синусной схемы, при прочих равных условиях, в 2 раза меньше, чем тангенсной. На рис. 63 показаны зависимости между перемещениями ведомого и ведущего звеньев теоретического механизма (прямая линия 2) для синусной (1) и тангенсной (5) схем. Как видно из рис. 63, синусная схема создает ускоряющееся перемещение ведомого звена при равномерном движении ведущего измерительного наконечника. Тангенсная схема создает все более замедляющееся движение ведомого звена.

Как будет показано дальше, для регулирования синусного механизма с целью уменьшения нарастания погрешности следует увеличивать малое плечо a_0 механизма (см. рис. 61), для тангенсного механизма это плечо следует уменьшить (см. рис. 62).

Точность измерительных приборов

Пример 40.3. На рис. 64 показана схема многооборотной микронной головки, предложенной и исследованной В. Л. Кацем. Требуется найти оптимальное значение основных размеров рычажных передач, дающее наименьшее значение погрешности схемы механизма.

Схема представляет собой сочетание двух рычагов и одной зубчатой пары. Первый рычаг работает по тангенсной схеме. В этом случае при равномерном перемещении измерительного стержня из начального положения поворот рычага будет все более замедляться. Погрешность, возникающая при замедлении поворота рычага, может быть компенсирована ускоряющимся поворотом второго рычага, имеющим приближенно синусную схему, даже при значительных углах отклонения рычага.

Перемещение ведомого звена

$$S_{вм} = \varphi \frac{Rl}{r}, \quad (a)$$

где значение угла φ может быть выражено из подобия треугольников ABC и ADE $\frac{S_{вщ}}{b} = \frac{r \sin \varphi}{a + r \cos \varphi}$

или

$$S_{вщ} = \frac{b \sin \varphi}{\frac{a}{r} + \cos \varphi}. \quad (б)$$

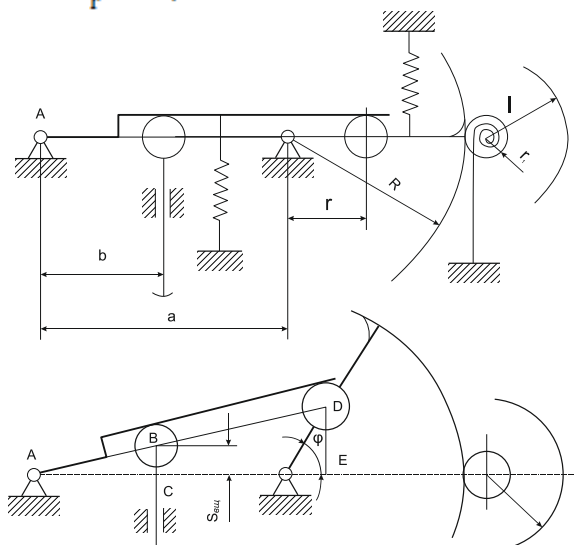


Рис. 63 Схема многооборотной микронной головки

Точность измерительных приборов

Из рассмотрения уравнений (а) и (б) видно, что погрешность схемы механизма будет наименьшей, если изменение $S_{\text{вщ}}$ будет максимально приближаться к линейной зависимости от $S_{\text{вщ}}$.

После разложения выражения (б) в ряд по степеням угла φ получим

$$S_{\text{вщ}} = \left. \frac{br}{a+r} \left\{ \varphi - \left[\frac{1}{6} - \frac{1}{2} \frac{r}{a+r} \right] \varphi^3 + \left[\frac{1}{120} - \frac{1}{8} \frac{r}{a+r} + \frac{1}{4} \frac{r^2}{(a+r)^2} \right] \varphi^5 + \dots \right\} \right. \quad (\text{в})$$

Задавшись максимальным углом отклонения второго рычага (при разработке прибора принято $\varphi=40^\circ$, можно подобрать такое отношение межосевого расстояния, a к длине плеча второго рычага r , при котором наибольшее значение суммы членов с третьей и пятой степенями φ было бы минимальным.

Из исследования на минимум суммы членов с третьей и пятой степенями φ формулы (в) было найдено, что при $a/r = 1,96$ и $\varphi = 40^\circ$ эта сумма будет наименьшей. Одновременно было доказано, что членами более высоких степеней вполне возможно пренебречь.

В результате была предложена двухрычажная схема микромера с ценой деления $0,002$ мм и пределами измерения ± 1 мм, с круговой шкалой, имеющей 200 делений; при этом стрелка совершает пять оборотов. Погрешность схемы в пределе измерения ± 1 мм не превышает $0,226$ мкм. При этом принято: $a=23,5$, $b = 4,24$, $r = 12$ и $l=30$ мм. Сектор является частью колеса с числом зубьев 225 , а стрелочный триб имеет число зубьев 10 .

41. РЕГУЛИРОВАНИЕ ИУ

Регулировка ИУ — это процесс, предусматриваемый при проектировании ИУ и имеющий целью приближение связи между выходным сигналом и входной величиной к заданной теоретической зависимости.

В измерительных приборах обычно различают регулировку рабочего участка и регулировку чувствительности.

Регулировка рабочего участка преследует цель совместить диапазон работы прибора с участком рабочей кривой, обладающим удовлетворительной линейностью в этих пределах или симметричностью погрешностей. Выбор участка с наибольшей линейностью относится лишь к ИУ, имеющим несимметричный характер функции погрешности, например, к кривошипно-шатунным механизмам.

Рычажные механизмы, например, синусные и тангенсные, имеют симметричную кривую изменения погрешностей относительно начального положения. В них регулируют начальное положение (симметричность погрешности) и передаточное отношение (чувствительность).

При регулировке передаточного отношения или чувствительности для ИУ с теоретической и линейной зависимостью путем изменения соответствующих регулируемых параметров получают при заранее выбранных значениях входной величины погрешности на выходе, равные нулю.

В зависимости от расположения нулевых точек различают виды регулировок чувствительности (передаточного отношения). Например, 1-й вид — регулировка до достижения номинальной чувствительности в нулевой точке шкалы; 2-й вид — регулировка до достижения нулевых погрешностей в нулевой точке шкалы и на конце шкалы; 3-й вид — регулировка до достижения нулевых погрешностей в нулевой точке шкалы и промежуточной точке при обеспечении равенства по модулю наибольшей и наименьшей погрешностей (метод половинения погрешности).

Рассмотрим основы регулирования передаточного отношения для механизма с симметричной кривой изменения погрешностей.

В примерах 40.1 и 40.2 погрешности схемы приборов находили при некоторых частных условиях, которые необходимо особо подчеркнуть. Частные условия заключались в следующем: 1) нулевому показанию по шкале прибора соответствовало

Точность измерительных приборов

начальное положение механизма; 2) номинальное передаточное отношение механизма принимали равным действительному передаточному отношению в начальном положении механизма. При этом, как видно из рис. 63, прямая, соответствующая теоретическому значению линейного передаточного отношения

$$i^* = \frac{S_{ВМ}}{S_{ВЩ}} = \text{const} \text{ была касательной к кривой передаточного}$$

отношения синусного и тангенсного механизмов (первый вид регулировки). Для этих двух механизмов действительное линейное передаточное отношение переменное, причем для синусного механизма оно больше номинального значения, т. е. $i_{\text{син}}^* > i^*$ и постепенно возрастает, а для тангенсного механизма действительное линейное передаточное отношение меньше номинального и убывает, т. е. $i_{\text{танг}}^* < i^*$. Действительное линейное передаточное отношение, согласно уравнению характеризуется тангенсом угла наклона касательной к кривой зависимости $S_{ВМ}$ от $S_{ВЩ}$.

В синусном механизме по рис. 61 длина плеча a_0 может подвергаться регулировке. Если принять длину a этого плеча больше номинальной a_0 , то зависимость $S_{ВМ}$ от $S_{ВЩ}$ и $S_{ВЩ}$ будет характеризоваться кривыми, показанными на рис. 64.

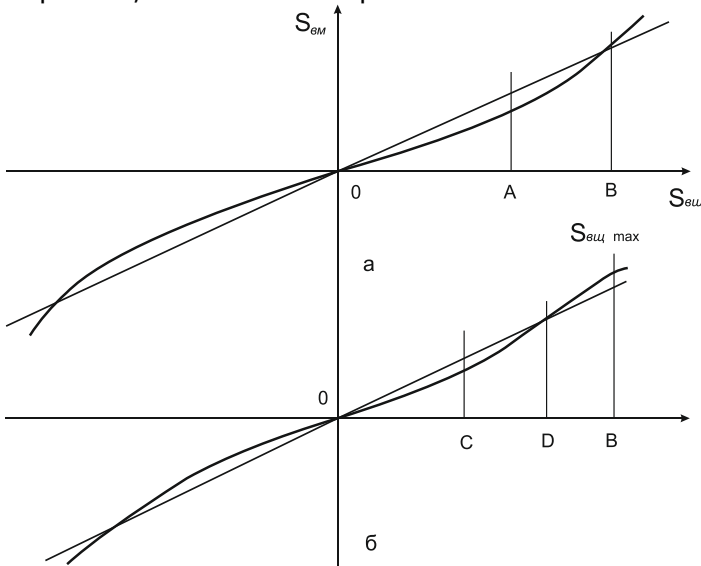


Рис. 64.

Точность измерительных приборов

Пример 41.1. На рис. 64, а плечо $a \pm$ выбрано так, чтобы погрешность на краях шкалы относительно ее середины была равна нулю (второй вид регулировки). При этом, поскольку показания прибора в начальном положении и в конце шкалы не имеют отклонений, то угол поворота рычага для действительной схемы прибора $\varphi_{\text{сх. макс}}$ должен быть равен углу поворота $\varphi_{\text{макс}}$ при теоретической схеме $S_{\text{вщ макс}} = a_0 \varphi_{\text{макс}} = a_1 \sin \varphi_{\text{макс}}$

$$\text{или } \Delta S_{\text{сх.изм макс}} = a_1 \sin \varphi_{\text{макс}} - a_0 \varphi_{\text{макс}} = 0$$

$$\text{откуда при } \Delta S_{\text{сх. изм макс}} = 0 \text{ получим } a_1 = a_0 \frac{\varphi_{\text{макс}}}{\sin \varphi_{\text{макс}}}$$

Из полученного соотношения видно, что плечо a_1 после регулировки линейного передаточного отношения должно быть больше номинальной длины плеча a_0 ($a_1 > a_0$).

Из рис. 64, а можно установить, что при регулировке при условии $\Delta S_{\text{сх. изм. макс}} = 0$ наибольшая теоретическая погрешность механизма возникает в промежуточной точке А

Эту погрешность можно найти, если приравнять нулю первую производную функции $\Delta S_{\text{сх.изм.}}$

$$a_1 \cos \varphi_A - a_0 = 0,$$

откуда определяют угол φ_A

$$\varphi_A = \arccos \frac{a_0}{a_1} = \arccos \frac{\sin \varphi_{\text{макс}}}{\varphi_{\text{макс}}}$$

Теоретическая погрешность в промежуточной точке А оказывается в несколько раз меньше наибольшей погрешности, возникающей в механизме при условии выполнения равенства $a_1 = a_0$.

Пример 41.2. Меньшая погрешность синусного механизма может быть достигнута в том случае, если отрегулировать плечо до значения a_2 из условия чтобы наибольшая отрицательная погрешность вблизи нуля была равна наибольшей положительной погрешности в конце рабочего участка шкалы (третий вид регулировки) — метод половинения погрешности.

В этом случае по рис. 64, б

$$\Delta S_{\text{сх.изм макс}} = - \Delta S_{\text{сх.изм с}} \quad (\text{а})$$

или

$$a_2 \sin \varphi_{\text{макс}} - a_0 \varphi_{\text{макс}} = - (a_2 \sin \varphi_{\text{с}} - a_0 \varphi_{\text{с}}) \quad (\text{б})$$

и

$$a_2 \cos \varphi_{\text{с}} - a_0 = 0$$

Неизвестные величины a_2 и $\varphi_{\text{с}}$ находят из равенства

$$a_2 = \frac{a_0}{\cos \varphi_{\text{с}}} \quad (\text{в})$$

Точность измерительных приборов

т. е. $a_1 > a_2 > a_0$, а значение угла φ_c может быть определено при подстановке выражения для γ_2 из уравнения (в) в уравнение (б)

$$\frac{a_0}{\cos\varphi_c} \sin\varphi_{\max} - a_0\varphi_{\max} = - \left(\frac{a_0}{\cos\varphi_c} \sin\varphi_c - a_0\varphi_c \right)$$

или

$$\frac{a_0}{\cos\varphi_c} - \varphi_{\max} = - \operatorname{tg}\varphi_c + \varphi_c$$

При известном значении φ_{\max} угла поворота рычага, соответствующего крайнему делению шкалы, путем подбора можно найти значение угла φ_c .

Пример 41.3. Для синусно-зубчатого прибора при пределе измерения ± 1 мм и $a_0=5,5$ мм погрешность схемы в измеряемых величинах $\Delta S_{\text{сх.изм}} = 0,0056$ мм. Следует определить наибольшую погрешность прибора и плечо a_1 , если механизм отрегулирован так, что погрешность в конце шкалы равна нулю.

Найти также наибольшую погрешность прибора и плечо a_2 , если регулировка произведена при условии половинения ошибки.

Длина плеча после регулировки по второму виду

$$a_1 = 5,5 \frac{0,1829}{0,1818} = 5,533 \text{ мм.}$$

Угол поворота рычага, при котором получается наибольшая погрешность. $0,1818$

$$\varphi_A = \arccos \frac{0,1818}{0,1829} = \arccos 0,9940; \varphi_A = 6^\circ 18'$$

Наибольшая погрешность на входе в измеряемых величинах $\Delta S_{\text{сх.изм. A}} = 5,533 * 0,1097 - 0,1100 = 0,002$ мм,

т. е. погрешность схемы в результате регулировки плеча a до значения a , снизилась с 5,6 до 2 мкм, т. е. в 2,8 раза.

При регулировании методом половинения погрешности найдем, что угол, соответствующий наибольшей отрицательной погрешности, равен

$$\frac{0,1818}{\cos\varphi_c} - 0,1829 = - \operatorname{tg}\varphi_c + \varphi_c,$$

откуда находим

$$\varphi_c = 5^\circ.$$

Длина плеча после регулировки методом половинения

$$a_2 = \frac{5,5}{0,9962} = 5,525 \text{ мм.}$$

Значение наибольшей погрешности в измеряемых величинах

Точность измерительных приборов

нах

$$\Delta S_{\text{сх.изм max}} = 5,525 * 0,1818 - 5,5 * 0,1829 = 0,0014 \text{ мм.}$$

При регулировании методом половинения погрешность схемы механизма уменьшилась до 1,4 мкм, т. е. в 4 раза по отношению к начальной.

Следовательно, можно отметить, что погрешность схемы при правильной регулировке передаточного отношения прибора может быть значительно снижена и доведена до значений, составляющих незначительную долю цены деления.

Значения рассчитанных величин для трех видов регулировок при пределах измерения ± 1 мм сведены в табл. II.1

Таблица 9

Виды регулировки	Значение величин
1-й	$a_0 = 5,5 \text{ мм}$ $\Delta S_{\text{сх.изм}} = 5,6 \text{ мкм}$ $\varphi_{\text{max}} = 10^{\circ}28'$
2-й	$a_1 = 5,533 \text{ мм}$ $\Delta S_{\text{сх.изм A}} = 2 \text{ мкм}$ $\varphi_a = 6^{\circ}18'$
3-й	$a_2 = 5,525 \text{ мм}$ $\Delta S_{\text{сх.изм C}} = 1,4 \text{ мкм}$ $\varphi_c = 5^{\circ}; \varphi_c = 0,5\varphi_{\text{max}}$ $\varphi_d = 7^{\circ}30'; \varphi_d = 0,75\varphi_{\text{max}}$

Для выполнения 3-го вида регулировки в сборочных чертежах должно быть дано указание:

- отрегулировать положение стрелки до получения симметричных погрешностей у краев шкалы;
- отрегулировать плечо а до получения нулевой погрешности в середине шкалы и на $\pm 0,75$ предела измерения;
- проверить равенство погрешностей в точках $\pm 0,5$ предела измерения и у краев шкалы.

Примеры регулирования ИУ приведены в работах.

В связи с рассмотрением вопроса о регулировках механизма прибора остановимся и на способах установки на нуль измерительных приборов. Обычно применяют два способа:

- 1) поворот шкалы относительно неподвижных механиз-

Точность измерительных приборов

ма и стрелки;

2) поворот платиков механизма совместно с осью вращения первого рычага.

Аналогичные результаты дает настройка на нуль навинчиванием измерительного наконечника на стержень и микроподачей стола с деталью или корпуса прибора.

Первый способ конструктивно прост, но ему присущ недостаток, поскольку нулевому показанию стрелки вследствие случайного поворота шкалы относительно механизма могут соответствовать различные его положения. При втором способе установку на нуль обеспечивают при неизменном положении механизма.

Это обстоятельство приобретает особое значение, так как оно позволяет при пользовании прибором вносить поправки по аттестату, учитывающие систематические погрешности прибора.

42. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ СХЕМЫ ИУ

Выше указывалось, что экспериментальный метод определения погрешности схемы ИУ применяют лишь в редких случаях, когда процессы, происходящие в приборе, недостаточно изучены, вследствие чего не может быть использован аналитический метод определения погрешности. Экспериментальный метод для механических приборов имеет место в механизмах с упругими звеньями или механизмах со сложным проявлением деформаций, при наличии износа и т. д.

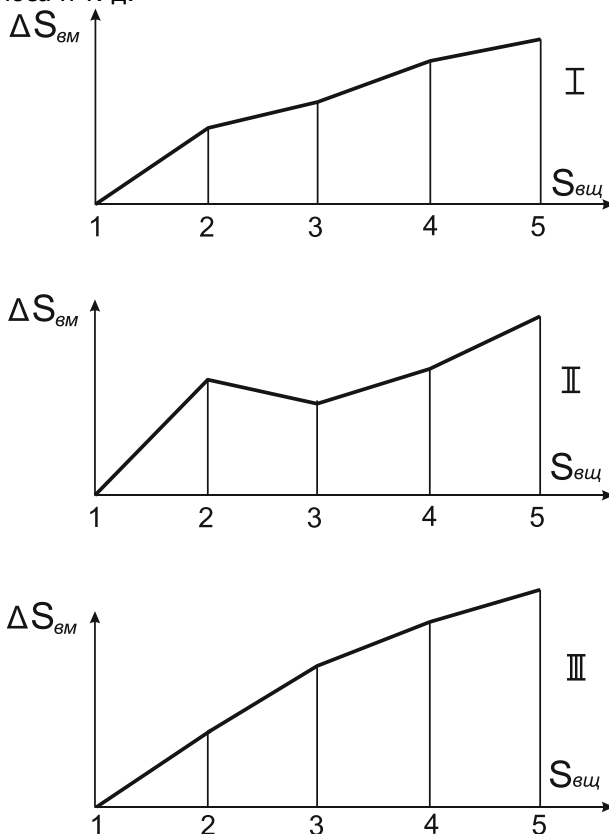


Рис. 65. Экспериментальное определение погрешности схемы ИУ

Точность измерительных приборов

В ряде случаев экспериментальный метод используют для пневматических, индуктивных и других приборов, основанных на различных физических принципах действия, при трудностях отыскания аналитического выражения для передаточной функции.

Экспериментальное определение погрешности схемы ИУ проводят на группе однородных приборов. На основе ряда сообщений устанавливают число точек, для которых определяют погрешности ИУ.

Каждый прибор — I, II, III на рис. 65 — многократно проверяют в выбранных точках и находят средние значения погрешностей в исследуемых точках для единичного экземпляра. Затем для всей группы приборов для тех же точек определяют средние значения погрешности по средним значениям, найденным для каждого экземпляра.

Экспериментально полученные значения обрабатывают, например, по методу наименьших квадратов, и таким путем определяют функциональное выражение для погрешности схемы ИУ.

При нахождении средних значений для каждой точки отдельного экземпляра прибора уменьшается влияние случайных погрешностей отсчета. Вместе с тем результаты, полученные при исследовании каждого экземпляра, содержат не только систематические погрешности, присущие его схеме, но и включают индивидуальные погрешности данного экземпляра. При нахождении средних значений для отдельных точек группы приборов уменьшается влияние индивидуальных погрешностей данного экземпляра. Совершенно очевидно, что полученная таким путем кривая систематических погрешностей группы приборов отражает не только погрешности, присущие схеме, но и систематические погрешности, характерные для принятой технологии изготовления и сборки приборов.

Точность экспериментального метода определяется как погрешностью применяемого способа поверки прибора, так и числом снятия показаний в каждой точке отдельного прибора, а также количеством приборов в обследуемой группе. Точность экспериментального метода должна быть оценена. Погрешность результата определяют на основании материалов, изложенных в части I книги.

Пример 42.1. При многократных испытаниях группы пневматических измерительных приборов с водяным манометром (диаметры сопел — входного $d_1 = 0,8\text{мм}$, измерительного $d_2 = 2\text{мм}$, рабочее давление воздуха $H = 500\text{ мм вод. ст.}$, атмо-

Точность измерительных приборов

сферное давление $P_a = 10000$ мм вод. ст.) найдены экспериментальные значения $h(z)$ измерительного давления при разных размерах измерительного зазора между соплом и поверхностью детали.

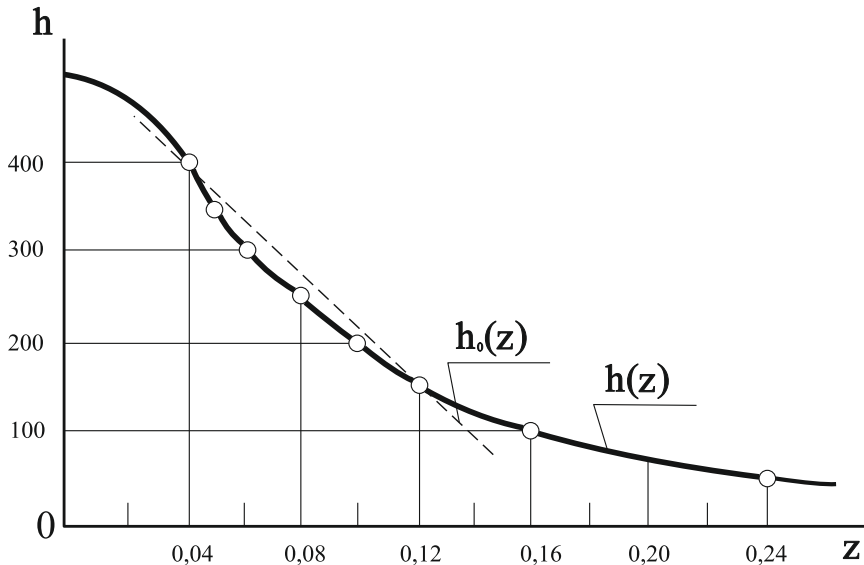


Рис. 66. Экспериментальные значения $h(z)$ измерительного давления при разных размерах измерительного зазора между соплом и поверхностью детали.

После аппроксимации этих результатов, с использованием формулы, упоминаемой в, найдена эмпирическая зависимость

$$z = \frac{d_1^2}{4d_2} \sqrt{\frac{H}{h} - \frac{H}{P_a} \frac{h}{H} + \frac{H}{P_a} - 1}.$$

При равномерно» шкале в приборе должна осуществляться линейная зависимость $h_0(z)$.

Принимая, что она отвечает двум экспериментальным значениям ($z_1=0,04$ мм и $h_1=400$ мм вод. ст. и $z_2=0,12$ мм и $h_2=150$ мм вод. ст.), найдем теоретическую зависимость $z_0 = 0,00032(525 - h)$.

Погрешность схемы на входе, определенная из этих условий $\Delta z_{сх} = z - z_0$, может быть вычислена для любого значения зазора в пределах диапазона измерений.

43. О РАЦИОНАЛЬНОМ ПОСТРОЕНИИ ПЕРЕДАЮЩИХ РЫЧАГОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

В различных измерительных приборах широко используют рычажные передачи со скользящим контактом. Основным требованием, предъявляемым к ним, является передача движения от одной поступательно движущейся системы к другой с постоянным передаточным отношением.

Чаще всего в рычажных передачах применяют сопряжение поверхностей сфер и плоскостей, поскольку они могут быть выполнены с наибольшей точностью.

При конструировании подобных рычажных передач обычно возникает затруднение в выборе соотношения между диаметрами сфер и размерами плеч рычага, а также расположением сфер и рабочих плоскостей, обеспечивающим отсутствие погрешности схемы.

Сформулируем общие положения, которые могли бы облегчить конструирование рациональных рычагов, не имеющих погрешности схемы.

В зависимости от того, какому из звеньев системы принадлежит сфера, различают синусные и тангенсные рычаги. На рис. 67, а показан рычаг, на конце которого закреплен сферический элемент, контактирующий с поступательно движущейся плоскостью. Такой рычаг называют синусным, поскольку перемещение, отсчитываемое от начального положения рычага, $S = l \sin \alpha$; при отсчете от произвольного положения $S = l(\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1)$.

Показанный на рис. 67, б рычаг является тангенсным, так как поступательное перемещение, отсчитываемое от начального положения рычага $S = l \operatorname{tg} \alpha$; при отсчете от произвольного положения $S = l(\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1)$.

Для получения постоянного соотношения между поступательным перемещением ведомого и ведущего звеньев при применении двуплечей рычажной передачи необходимо соблюсти следующие условия:

- 1) оба передающих плеча рычага должны быть либо синусными (рис. 68, а), либо тангенсными (рис. 68, б);
- 2) центры сфер должны быть расположены на теоретическом рычаге в его начальном положении, а обе плоскости быть параллельны плечам теоретического рычага в этом положении

Точность измерительных приборов

или составлять с ними одинаковый угол, отсчитываемый в одном направлении.

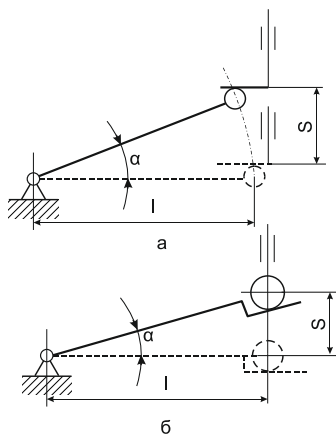


Рис. 67.

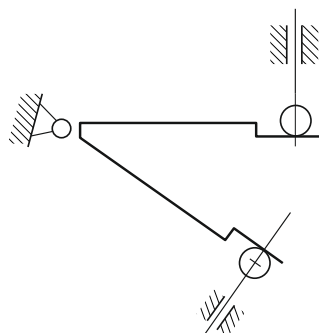
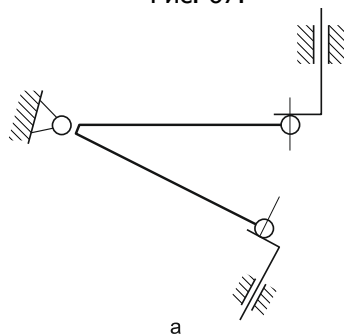


Рис. 68.

Точность измерительных приборов

Под теоретическим рычагом понимается рычаг, образованный перпендикулярами, опущенными из точки качания рычага на направления поступательных движений. Такое положение рычага называется начальным. В этом случае радиусы сфер могут быть любыми, и их выбирают независимо от плеч рычага.

Во многих случаях по конструктивным соображениям оказывается целесообразным смещать центры сфер с теоретического рычага в начальном положении. Так, тангенсный рычаг проще выполнять, если рабочие плоскости совпадают с теоретической линией рычага, т. е. при своем продолжении проходят через ось его качения.

При смещении центров сфер с теоретических линий рычагов в их начальном положении для создания постоянства передаточного отношения необходимо соблюдать, кроме условия «1», еще следующие два условия (рис. 69, а и б);

3) отношение размеров A и a смещения центров сфер от теоретических плеч рычага в начальном положении должно быть равно отношению длин плеч рычагов $\frac{A}{a} = \frac{L}{l}$, где длины плеч определяются по теоретическому рычагу в начальном положении;

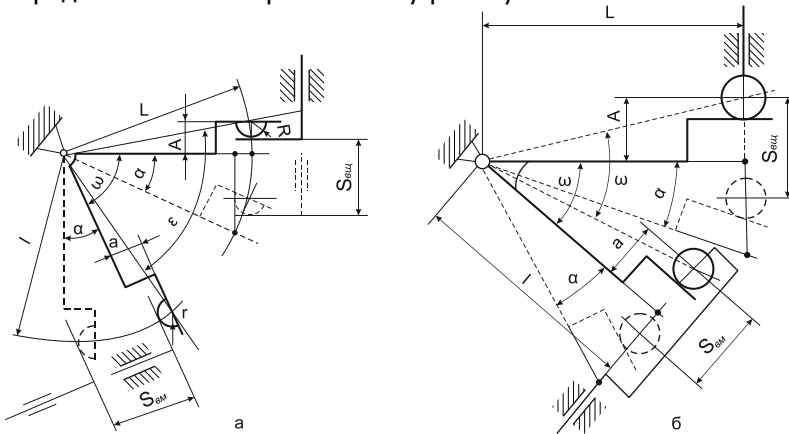


Рис. 69

4) оба смещения центров должны быть направлены в одну и ту же сторону (по часовой или против часовой стрелки). В этом случае радиусы сфер также могут быть любыми независимо от плеч рычага.

Точность измерительных приборов

Два последних условия можно объединить со вторым условием, если его сформулировать более полно;

2') центры сфер должны быть расположены на теоретическом рычаге в его начальном или другом положении, а обе плоскости быть параллельны плечам теоретического рычага в этом положении или составлять с ними одинаковый угол, отсчитываемый в одном направлении.

Как будет доказано ниже, в частном случае, когда тангенсные рычаги выполняют прямыми, т. е. рабочие плоскости проходят через ось качания рычага и размеры смещения центров сфер равны их радиусам, радиусы сфер, согласно третьему условию, должны находиться в отношении, равном отношению длин плеч рычагов, т.е.

$$\frac{R}{r} = \frac{L}{l}$$

Доказательство для синусных рычагов

Согласно рис. 69, а

при смещении центров сфер против часовой стрелки имеем

$$\sin \alpha = \frac{S_{вщ} - (A - R) + (A \cos \alpha - R)}{L} \quad (а)$$

или

$$\sin \alpha = \frac{S_{вщ}}{L} - \frac{A}{L} \quad (а')$$

Аналогично для второго плеча:

$$\sin \alpha = \frac{S_{вм}}{l} - \frac{l}{L} \quad (б)$$

Если смещения $\frac{A}{a} = \frac{L}{l}$, то $\frac{A}{l} = \frac{a}{l}$. Тогда из двух выражений для синуса угла поворота находим, что

$$\frac{S_{вм}}{S_{вщ}} = \frac{l}{L} \quad (в)$$

Если бы смещения были осуществлены не в одну сторону относительно оси качания рычага, то знаки перед вторыми членами в выражениях (а') и (б) были бы разными и рычаг не обеспечивал бы постоянного передаточного отношения.

Следует отметить, что при преобразовании выражения (а) радиусы R и соответственно r оказались исключенными, что указывает на отсутствие влияния радиуса сферы на передаточное отношение механизма.

Доказательство для тангенсного механизма

Согласно рис. 69, б для тангенсного рычага со смещением обоих центров сфер в одном направлении и параллельным расположением рабочих плоскостей по отношению к теоретическим линиям рычага в начальном положении имеем

$$\operatorname{tga} = \frac{S_{\text{вщ}} - A + \frac{A}{\cos\alpha}}{L}, \quad (\text{г})$$

откуда

$$\operatorname{tga} = \frac{S_{\text{вщ}}}{L} + \frac{A}{L} * \frac{1 - \cos\alpha}{\cos\alpha}, \quad (\text{г}')$$

Аналогично для ведомого плеча

$$\operatorname{tga} = \frac{S_{\text{вщ}}}{l} + \frac{A}{l} * \frac{1 - \cos\alpha}{\cos\alpha}, \quad (\text{д})$$

Если величина смещения пропорциональна длинам плеч,
 $\frac{A}{a} = \frac{L}{l}$ то $\frac{A}{L} = \frac{a}{l}$, что совместно с выражениями (г') и (д) дает
 $\frac{S_{\text{вщ}}}{S_{\text{вщ}}} = \frac{l}{L}$.

В случае, когда смещения направлены в разные стороны, знаки в выражениях (г') и (д) перед вторыми членами будут отличаться, и в этом случае в механизме не будет соблюдаться постоянство передаточного отношения.

Как видно, в выражения (г) и (д) не входят радиусы сфер, что указывает на возможность их независимого выбора.

На рис. 70, а показан тангенсный механизм с прямыми рычагами, в котором радиусы сфер пропорциональны длинам плеч. Поскольку оба центра сфер смещены в одном направлении, то механизм будет осуществлять постоянное передаточное отношение.

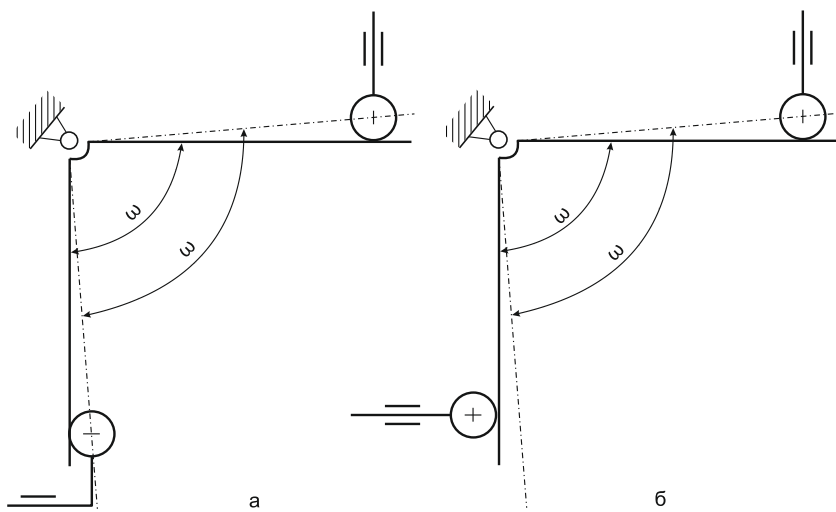


Рис. 70. Тангенсный механизм с прямыми рычагами

Механизм, приведенный на рис. 70, б, не будет обеспечивать постоянного соотношения между ведомым и ведущим перемещениями, так как сферы смещены в разных направлениях, т. е. их центры не лежат на теоретическом рычаге.

Использование указанных выше положений позволяет конструировать передающие рычаги, осуществляющие (при точном их изготовлении) постоянное передаточное отношение между ведомым и ведущим перемещениями, т. е. отсутствие погрешности схемы.

44. ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИВЫГОДНЕЙШИХ ПАРАМЕТРОВ ИУ

На первом этапе разработки ИУ устанавливают схему всего устройства и затем рассчитывают номинальные параметры всех составляющих элементов, влияющих на выходную характеристику.

Для приборов, у которых теоретическая характеристика должна быть линейна, а выбранная схема это не обеспечивает, принимают ряд мер к линеаризации характеристики:

1) расширяют линейный участок первичного преобразователя или устройств передачи и преобразования информации за счет конструктивных мер, например, применяя эжекторную пневматическую систему взамен обычной, значительно расширяющей линейный участок характеристики пневматического преобразователя;

2) находят наивыгоднейшие параметры данной схемы, обеспечивающие наименьшее отклонение от линейности на заданном участке;

3) корректируют нелинейность за счет введения отрицательной

обратной связи;

4) корректируют нелинейность путем снижения чувствительности, например, увеличивая плечо a_0 в синусном механизме и уменьшая угол поворота;

5) снижают нелинейность на выходе за счет взаимной коррекции преобразователей так, чтобы произведение их чувствительностей было наиболее близким к постоянной величине, например, сильфон в сочетании с кривошипно-шатунным множительным механизмом или сочетание синусного и тангенсно-го механизмов.

В приборостроении используют преимущественно кинематический способ проектирования сочленений и самих механизмов. Кинематический способ проектирования сочленений позволяет: а) уменьшить число звеньев механизма; б) повысить точность; в) спроектировать механизм, как статически определимую систему. При кинематическом проектировании механизма его структура удовлетворяет уравнению механизма нулевого семейства (в таком механизме отсутствуют общие наложенные связи). При таком

Точность измерительных приборов

проектировании можно исключить добавочные упругие деформации, возникающие в плоских механизмах при неперпендикулярности осей вращательных пар плоскости движения звеньев. Ниже рассмотрен вопрос о точностном синтезе, т. е. определении наивыгоднейших параметров схемы.

При проектировании прибора возникает задача определения наиболее рациональных параметров, при которых погрешность, присущая схеме, окажется наименьшей.

В примерах выше было показано, что изменяя размер a_0 , оказалось возможным влиять на наибольшую погрешность схемы. Особенно важно, что размер a_0 , выбранный из соотношений, действующих для расчетной схемы, т. е. найденный по номинальному передаточному отношению в начальном положении, не является наивыгоднейшим.

Таким образом, необходимо использовать методы синтеза ИУ, позволяющие проектировать прибор, исходя из данных условий точности его работы.

Метод проектирования из условий заданной точности применительно к механическим приборам с жесткими звеньями разработан М. М. Кемпинским и использован в.

В своих важнейших частях метод базируется на использовании теории наилучшего приближения функций, разработанной акад. П. Л. Чебышевым, а именно, на применении полиномов, наименее отклоняющихся от нуля в заданном промежутке. Полином наименьшего отклонения степени n с коэффициентом при x^n , равным единице, отличается тем, что на заданном промежутке его максимальное значение меньше, чем у любого другого полинома той же степени с коэффициентом единица при x^n . Отметим, что у каждой функции наименьшего отклонения все экстремумы равны по модулю и чередуются по знаку (рис. 71, а).

Точность измерительных приборов

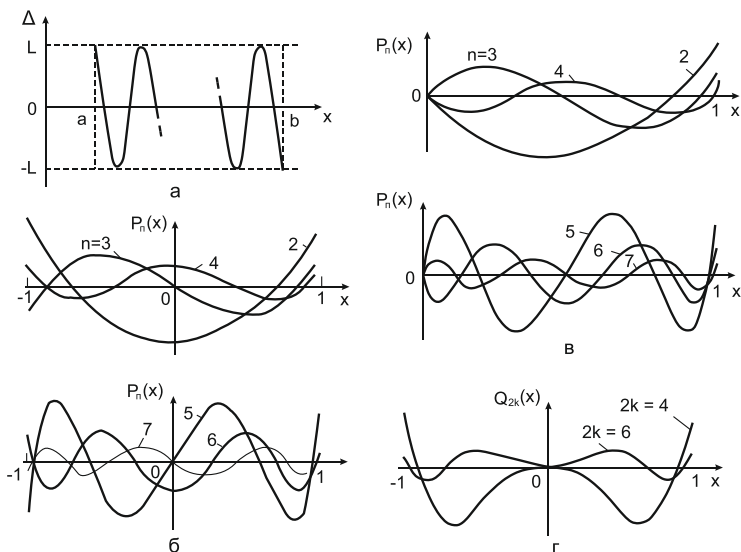


Рис. 71

С точки зрения точного синтеза параметры схемы должны быть определены из условия сведения к минимуму погрешности схемы $\Delta S_{СХ}$ на заданном промежутке $[a; b]$ изменения $S_{ВЩ}$. Чтобы $\Delta S_{СХ}$ была минимальной, надо сделать ее наименее отклоняющейся от нуля на участке $[a; b]$, что, однако, возможно лишь в частных случаях. Поэтому будем рассматривать взамен $\Delta S_{СХ}$ многочлен k -й степени $F_k(S_{ВЩ}, q_1, q_2, \dots, q_T)$, определяемый теми же параметрами и осуществляющий наилучшее приближение функции $\Delta S_{СХ}$ на участке $[a; b]$.

Из теории наилучших приближений известно, что непрерывные и не очень сложные функции могут быть заменены такими многочленами с высокой точностью, заведомо достаточной для технических задач.

Обозначим разность между заменяющим многочленом k -й степени и функцией погрешности схемы через $E_k(\Delta S_{СХ})$:

$$E_k(\Delta S_{СХ}) = \max | F_k(S_{ВЩ}, q_1, q_2, \dots, q_m) - \Delta S_{СХ}(S_{ВЩ}, q_1, q_2, \dots, q_m) |. \quad (a)$$

Известно, что $E_k(\Delta S_{СХ})$ убывает с увеличением степени k , стремясь к нулю. Поэтому в принципе можно указать такую наименьшую степень n , для которой $E_n(\Delta S_{СХ})$ окажется пренебрежимо малой величиной при выбранной точности расчета, т. е. можно будет считать, что

$$\Delta S_{СХ}(S_{ВЩ}, q_1, q_2, \dots, q_n) \approx F_n(S_{ВЩ}, q_1, q_2, \dots, q_n). \quad (б)$$

Для того чтобы найти налагаемые на параметры q_1

Точность измерительных приборов

условия, при которых многочлен F_n будет наименее отклоняющимся от нуля, необходимо перейти от промежутка $[a; b]$ к промежутку $[-1; +1]$, заменяя переменную $S_{вщ}$ на переменную x по формулах $x = \frac{2S_{вщ} - a - b}{b - a}$ или от промежутка $[0; b]$ к промежутку $[0; +1]$, заменяя переменную $S_{вщ}$ на x по формуле $x = \frac{S_{вщ}}{b}$.

Таблица 10

п	$P_{сж}(x)$	Наибольшее отклонение от нуля в промежутке $[-1; +1]$	Точки наибольшего отклонения x_i	Корни x_k
2	$x^2 - 0,5000$	0,5000	0; ± 1	$\pm 0,7071$
3	$x^3 - 0,7500$	0,2500	$\pm 0,5000; \pm 1$	0; $\pm 0,8660$
4	$x^4 - x^2 - 0,1250$	0,1250	0; $\pm 0,7071; \pm 1$	$\pm 0,3827; \pm 0,9239$
5	$x^5 - 1,2500x^3 + 0,3125x$	0,0625	$\pm 0,8090; \pm 1$	$\pm 0,5878; \pm 0,9511$

Таблица 11

п	$R_n(x)$	Наибольшее отклонение от нуля в промежутке $[0; 1]$	Точки наибольшего отклонения x_i	Корни x_k
2	$x^2 - 0,8284x$	0,1716	0,4142; 1	0; 0,8284
3	$x^3 - 1,3923x^2 + 0,4308x$	0,0385	0,1961; 0,7320; 1	0; 0,4641; 0,9282
4	$x^4 - 1,9209x^3 + 1,1135x^2 - 0,1835x$	0,0091	0,1127; 0,4802; 0,8478; 1	0; 0,2813; 0,6791; 0,9604
5	$x^5 - 2,4373x^4 + 2,0477x^3 + 0,6781x^2 + 0,0696x$	0,0022	0,0728; 0,3291; 0,6458; 0,9021; 1	0; 0,1862; 0,4875; 0,7887; 0,9749

Таблица 12

п	$R_n(x)$	Наибольшее отклонение от нуля в промежутке $[-1; +1]$	Точки наибольшего отклонения x_i	Корни x_k
4	$x^4 - 0,8284x^2$	0,1716	$\pm 0,6436; \pm 1$	0; 0,9102
6	$x^6 - 1,3923x^4 + 0,4308x^2$	0,0385	$\pm 0,4429; \pm 0,8556; \pm 1$	0; $\pm 0,6813; \pm 0,9634$

Многочлен $F_n(x, q_1, q_2 \dots q_T)$ будет наименее отклоняющимся от нуля, если он с точностью до постоянного множителя будет равен одному из наименее отклоняющихся от нуля полиномов $P_n(x)$, $R_n(x)$ или $Q_n(x)$ той же степени с коэффициентом при x^n , равным единице. Это равенство достигается при совпадении корней многочлена $F_n(x, q_1, q_2 \dots q_T)$ и соответствующего полинома. В табл. 10 - 12 приведены наименее отклоняющиеся от нуля полиномы; их наибольшие отклонения от нуля; точки x_i , в которых достигается это наибольшее отклонение, а также корни полиномов x_k , при значениях которых отклонения равны нулю.

На рис. 71, б, в и г приведены графики этих функций.

точность расчетов сравнительно невелика (особенно при расчете погрешности), а функции ΔS_{cx} в промежутках изменения аргументов, используемых для механизмов, меняются довольно плавно. Поэтому число n обычно не превышает пяти, в худших случаях — семи, что дает возможность, если $E_k[\Delta S_{cx}]$ оценить затруднительно, вести расчет без предварительного определения числа n . Для этого полагают $n=3$ и определяют параметры механизма q_i из системы (в).

Как в этом случае, так и при определении n по оценкам $E_k[\Delta S_{cx}]$, необходимо проверить правильность выбора n следующим приемом.

Вычисляют значение ΔS_{cx} в точках x_i , являющихся точками наибольшего уклонения соответствующего многочлена $P_n(x)$, $R_n(x)$ или $Q_n(x)$ (см. табл. 10 — 12). Если наибольшие полуразности этих значений $[\Delta S_{cx}(x_i)]$ являются пренебрежимо малыми при выбранной точности отсчета, то цель достигнута. В противном случае следует увеличить число узлов интерполяции, перейдя к $P_{n+2}(x)$, $R_{n+1}(x)$ или $Q_{n+2}(x)$ и вновь определить параметры прибора q_i из системы (в), приведенной на с. 228.

Если не только полуразности, но и сами значения $n|\Delta S_{cx}(x_i)|$ окажутся пренебрежимо малыми, то следует уменьшить n .

Если при правильном выборе $n|\Delta S_{cx}|_{\max}$ окажется неприемлемо большим по условиям задачи, то следует перейти к большему n .

Может случиться также, что система (в) не имеет решения. Тогда может быть использован путь введения дополнительного параметра. В [11.49, 11.50] рассмотрена также возможность использования искаженной шкалы и шкалы с нормированным участком.

Пример II.8. Определить длину a плеча синусного механизма по рис. 11.5, дающего наименьшую погрешность схемы при пределах измерения

$$S_{вщ\max} = \pm 1 \text{ мм},$$

Погрешность схемы

$$\Delta S_{cx} = \left(\arcsin \frac{S_{вщ}}{a} - \frac{S_{вщ}}{a_0} \right) \frac{Rl}{r}.$$

Заменив переменную $S_{вщ}$ на x , изменяющуюся в пределах $[+1; -1]$, получим

$$x = \frac{S_{вщ}}{S_{вщ\max}},$$

Точность измерительных приборов

откуда

$$S_{\text{вщ}} = x S_{\text{вщ max}};$$

$$\Delta S_{\text{сх}} = \left(\arcsin x \frac{S_{\text{вщ max}}}{a} - x \frac{S_{\text{вщ max}}}{a_0} \right) \frac{Rl}{r}. \quad (\text{г})$$

Разложив

$$\arcsin x \frac{S_{\text{вщ max}}}{a} = x \frac{S_{\text{вщ max}}}{a} + \frac{1}{6} \left(x \frac{S_{\text{вщ max}}}{a} \right)^3$$

и приняв $a \approx a_0$, найдем

$$\Delta S_{\text{сх}} = \frac{1}{6} \left(x \frac{S_{\text{вщ max}}}{a} \right)^3 \frac{Rl}{r}$$

Многочлен Чебышева $P_n(x)$, наименее отклоняющийся от нуля в промежутке $[-1; +1]$ степени $n=3$, согласно табл. П.2 имеет корни $x_k=0$ и $x_b, = \pm 0,8660$. При этих значениях отклонения должны быть равны нулю.

Подставим в уравнение (г) найденный корень $x_k = 0,8660$ и приравняем полученное выражение нулю, тогда

$$\left[\arcsin 0,866 \frac{S_{\text{вщ max}}}{a} - 0,866 \frac{S_{\text{вщ max}}}{a_0} \right] \frac{Rl}{r}$$

или

$$\arcsin 0,866 \frac{S_{\text{вщ max}}}{a} = 0,866 \frac{S_{\text{вщ max}}}{a_0};$$

Окончательно длина a , создающая наименьшую погрешность механизма $a = \frac{0,866 S_{\text{вщ max}}}{\sin 0,866 \frac{S_{\text{вщ max}}}{a_0}} = 5,523$.

Наибольшая погрешность механизма при выполнении поставленных условий будет при $x_i = 0,5$ (согласно табл. П.2). В измеряемых величинах она будет равна $\Delta S_{\text{сх}} = \frac{1}{6} \left(\frac{0,5 * 1}{5,523} \right)^3 * 5,523 * 1000 = 0,68$ мкм.

Наибольшая погрешность схемы механизма оказалась незначительной хотя по условиям примера механизм проектируется из условий большого хода ведущего звена ($S_{\text{вщ max}} = \pm 1$ мм) и связанных с этим значительных углов поворота ведущего звена от нейтрального положения. Наивыгоднейшая регулировка механизма методом половинения ошибки (см. пример П.6) дала погрешность в 2 раза большую, чем при выборе наивыгоднейших параметров механизма на основе точностного синтеза.

Решающую роль в неточности работы ИУ играют техноло-

Точность измерительных приборов

гические погрешности, вызывающие отклонения размеров, форм, взаимного расположения и шероховатости поверхности элементов кинематических пар в механических приборах или же отклонение омических сопротивлений, емкостей и индуктивностей в электрических ИУ, или отклонения размеров проходных сечений, объемов камер, сопротивлений и упругостей в пневматических приборах и т. д.

Технологические погрешности звеньев механизма являются результатом погрешностей процесса изготовления деталей прибора и их монтажа.

Технологические погрешности вследствие нарушения параллельности осей вращения, плоскостей движения и т. д. нередко превращают плоский механизм в пространственный. При этом пассивные связи, имеющиеся в плоском механизме и не препятствующие его работе, могут сделать механизм неподвижным.

Если для плоского механизма без погрешностей степень подвижности определяют по формуле

$$W_{пл} = 3(n - 1) - 2p_1 - 1p_2,$$

то с учетом погрешностей степень подвижности должны находить как для пространственного механизма по формуле

$$W_{пр} = 6(n - 1) - 5p_1 - 4p_2 - 3p_3 - 2p_4 - 1p_5,$$

где n — число звеньев; p_s — число кинематических пар с s степенями подвижности.

Например, для кривошипно-шатунного механизма, имеющего погрешности, при $n = 4$ и $p_1 = 4$ (четыре пары с одной степенью подвижности) движение невозможно, так как

$$W_{пр} = (6 \cdot 3) - (5 \cdot 4) = -2 \text{ (заклинивание).}$$

Необходимо изменить степень подвижности кинематических пар, например, принять $n = 4$, $p_1 = 3$ и $p_4 = 1$, тогда

$$W_{пр} = (6 \cdot 3) - (5 \cdot 3) - (2 \cdot 1) = 1,$$

т. е. механизм обладает одной степенью подвижности.

Пара p_4 может быть выполнена в месте соединения шатуна и ползуна в виде элементов цилиндра и сферы.

Кинематический метод проектирования уменьшает число звеньев механизма, повышает точность его работы и делает его статически определимым даже при наличии погрешностей изготовления.

В науке о точности механизмов определились два направления в рассмотрении погрешностей механизмов. Одно

Точность измерительных приборов

направление рассматривает погрешности элементов звеньев механизма в виде отдельных элементарных отклонений, называя их «первичными погрешностями механизма» .

Подобный подход к изучению точности механизма является основой теории точности механизмов, созданный акад. Н. Г. Бруевичем и его последователями.

Другое направление, созданное проф. д-ром техн. наук Н. А. Калашниковым и разрабатываемое его учениками, базируется на изучении точности механизмов на комплексных погрешностях звеньев, непосредственно связанных с нарушениями технологического процесса изготовления деталей и проявлением их при работе механизма. При этом изучаются комплексные погрешности, нарушающие закономерности действия механизма. Такие неточности называются «действующими погрешностями механизма».

Рассмотрим последовательно эти два подхода.

45. ПЕРВИЧНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ МЕХАНИЗМА

Первичными погрешностями механизма называют «отклонения расположения в звене (механизма) элементов кинематических пар от идеальных положений и отклонения существующих поверхностей элементов от заданных геометрических форм. Другими словами, первичная погрешность механизма — это отклонения в расстоянии между кинематическими элементами звена, отклонение размеров элементов, их формы и взаимного расположения.

Метод рассмотрения первичных погрешностей механизма, предложенный акад. Н. Г. Бруевичем, позволяет строго определить возможное число первичных погрешностей каждого звена и в целом механизма.

Каждое звено механизма состоит из двух или более элементов кинематических пар. Поверхность каждого элемента кинематической пары характеризуется вполне определенным числом параметров. Предполагая, что каждый параметр при реальном выполнении может иметь неточность, принимают, что каждое звено имеет число первичных погрешностей, равное числу параметров, определяющих поверхности элементов кинематических пар звена. При этом во внимание принимают лишь рабочие поверхности элементов кинематических пар, т. е. поверхности, определяющие возможное взаимное движение одного звена относительно другого.

Элемент кинематической пары может быть выполнен в виде точки. На рис. 72, а показан качающийся рычаг, оканчивающийся точкой А, соприкасающейся с поверхностью кулачка.

Положение точки А относительно произвольной системы координат определяется тремя координатами. Каждая из координат может отклоняться относительно номинального значения. Таким образом, элемент кинематической пары в виде точки может иметь три скалярные первичные погрешности (с. п. п.).

Точность измерительных приборов

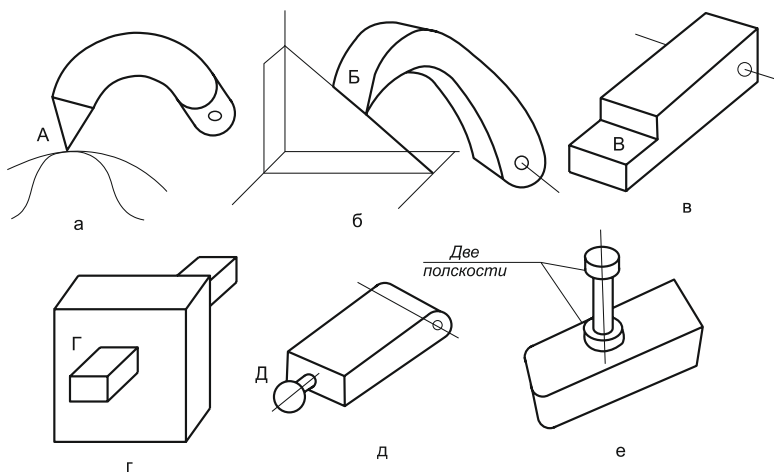


Рис. 72. Кинематической пары

Если элемент кинематической пары выполнен в виде линии В (рис. 72, б), то положение этой линии определяется четырьмя параметрами — четырьмя координатами двух точек пересечения линии с двумя координатными плоскостями или двумя координатами точки пересечения с одной координатной плоскостью и двумя направляющими углами. Следовательно, элемент пары в виде линии может иметь четыре с. п. п.

Элемент кинематической пары, выполненный в виде плоскости В (рис. 72, в), определяется тремя параметрами — расстояниями по осям до точек пересечения плоскости с тремя осями координат или же расстоянием по одной оси до точки пересечения ее с плоскостью и двумя направляющими углами. Таким образом, для элемента пары в виде плоскости возможно три с. п. п.

Если элемент Г (рис. 72, г) состоит из n плоскостей, например, четырех, то число с. п. п. будет равно $3n$.

Число с. п. п. для элемента кинематической пары, имеющего форму сферы Д (рис. 72, д), равно четырем — три отклонения координат центра сферы и отклонение радиуса сферы.

Нетрудно установить, что для элемента кинематической пары, имеющего форму кругового цилиндра, число с. п. п. равно 5, а для некруглого цилиндра — 6. Для кругового неусеченного конуса число с. п. п. равно 7, а для некругового — 8. Число с. п. п. для кругового усеченного конуса также будет равно 8.

Если элемент кинематической пары состоит из цилиндра и двух плоскостей (рис. 72, е), то число скалярных первичных по-

грешностей равно И (2×3 для двух плоскостей и 5 для кругового цилиндра).

Число первичных погрешностей звена, в общем случае, равно сумме чисел с. п. п. всех элементов кинематических пар, имеющих на этом звене. В более сложных случаях приходится принимать во внимание некоторые элементы монтажных поверхностей.

При рассмотрении погрешностей звена обычно первичные погрешности отсчитывают не от произвольных осей, а от координатных осей, связанных с элементами кинематических пар. Такой выбор осей целесообразен с точки зрения технологической, метрологической и эксплуатационной, так как при этом число первичных погрешностей звена уменьшается на шесть.

Рассмотрим ряд примеров.

Пример 45.1. Определить число первичных погрешностей звена, имеющего элементы кинематических пар, в виде двух шарниров, состоящих из цилиндрических отверстий и двух торцевых плоскостей (рис. 73).

Общее число первичных погрешностей при произвольном выборе осей координат равно $(5+2-3)2=22$ с. п. п.

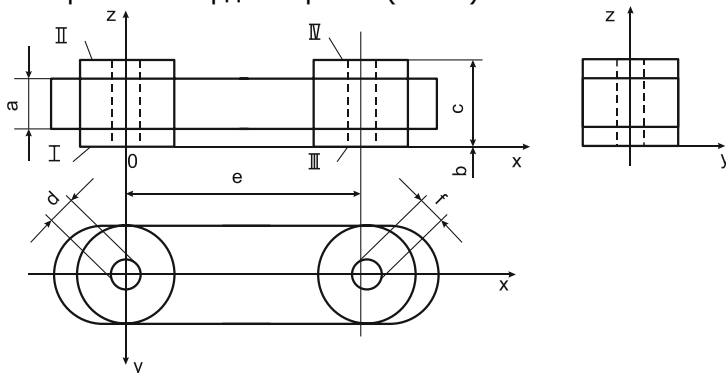


Рис. 73. Кинематическая пара из шарниров и торцевых плоскостей

Свяжем отсчетные оси x , y , z с элементами кинематических пар. За начало отсчета примем точку O пересечения торца I с осью левого отверстия; ось z совместим с осью отверстия; ось x направим так, чтобы она пересекла ось второго отверстия. При таком выборе осей общее число первичных погрешностей уменьшится на 6 с. п. п., так как устраняется 4 с. п. п., определяющие возможные смещения и повороты оси левого отверстия, 1 с. п. п.,

Точность измерительных приборов

соответствующая смещению торца вдоль оси g , и 1 с. п. п., соответствующая смещению оси правого отверстия в направлении оси y .

Таким образом, элемент левого шарнира будет иметь $11 - 5 = 6$ с. п. п., и элемент правого шарнира $11 - 1 = 10$ с. п. п. Общее число первичных погрешностей звена будет равно $22 - 6 = 16$ с. п. п.

Перечислим эти $6 + 10 = 16$ с. п. п.

Для левого элемента: отклонение размера диаметра отверстия (1 с. п. п.), повороты плоскости / вокруг осей x и y (2 с.п.п.), отклонение расстояния a между плоскостями 1 ш II (1 с. п. п.) и повороты плоскости // вокруг осей x и y (2 с. п. п.), Всего 6 с. п. п.

Для правого элемента: отклонение размера диаметра отверстия (1 с.п.п.), отклонение размера e между осями (1 с. п. п.), повороты оси отверстия вокруг осей x и y (2 с. п. п.), смещение плоскости III вдоль оси g , отклонение размера b (1 с.п. п.), повороты плоскости III вокруг осей x и y (2 с. п. п.), отклонение размера c (1 с. п. п.) и повороты плоскости IV вокруг осей x и y (2 сп. п.). Всего 6 с. п. п.

Некоторые из перечисленных 16 с. п. п. при назначении технических требований на точность изготовления детали могут быть оговорены совместно. Например, вместо двух поворотов каждой из четырех плоскостей I, II, III и IV может быть предъявлено требование в отношении их торцового биения относительно соответствующей оси. Можно оговорить параллельность плоскостей II и IV с плоскостями I и III. Соответствующий вариант должны выбирать из условий технологии, монтажа или эксплуатации данного звена в механизме.

Точность измерительных приборов

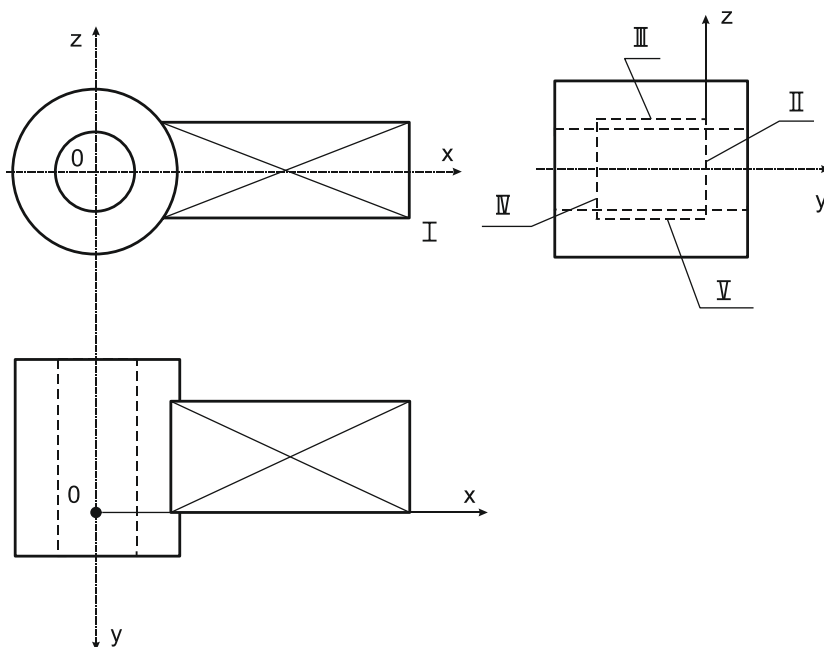


Рис. 74. Толкатель

Пример 45.2. Найти число первичных погрешностей для толкателя (рис. 74), элементы кинематических пар которого состоят из круглого цилиндра и призматического четырехгранного тела.

Выбираем ось так, чтобы ось y совпала с осью цилиндра, а ось x была параллельна плоскости V. При подобном выборе осей координат число первичных погрешностей звена будет равно $5+3*4=11$.

Цилиндр будет иметь одну погрешность — отклонение размера диаметра.

Четырехгранная призма будет иметь 10 с. п. п.: плоскость II — поворот вокруг осей x и z ; плоскость III — смещение и повороты вокруг осей x и y ; плоскость IV — смещение и повороты вокруг осей x и z ; плоскость V — смещение и поворот вокруг оси x .

Очевидно, что рассмотренный выбор осей координат определяет монтажные базы детали и, в большинстве случаев, также технологические и измерительные базы.

Число первичных погрешностей механизма равно сумме чисел первичных погрешностей всех звеньев и числа слоев смазок, имеющих в кинематических парах за вычетом числа пас-

Точность измерительных приборов

сивных связей механизма.

Метод определения числа первичных погрешностей звена и механизма наряду со своей стройностью и наличием увязки эксплуатационных, метрологических и технологических баз имеет ряд существенных недостатков. Основным недостатком является рассмотрение лишь погрешностей размеров и неточностей взаимного расположения элементов кинематических пар при игнорировании погрешностей формы, т. е. отступлений реальных форм поверхностей от теоретически заданных. Этот метод также не создает базы для анализа в единой системе появления погрешностей в процессе изготовления деталей и проявления их при работе механизма.

Вследствие этого метод первичных погрешностей механизма рекомендуется применять при исследовании приборов, имеющих простые формы элементов кинематических пар (точки, плоскости, сферы, цилиндры). В подобных случаях форма элементов может быть выдержана с высокой точностью, ее искажения не могут заметно отразиться на работе механизма, особенно в динамическом режиме, и поэтому не возникнет надобности в установлении связи между отклонениями формы кинематических элементов деталей и погрешностями процесса образования этих поверхностей.

46. ДЕЙСТВУЮЩАЯ ПОГРЕШНОСТЬ МЕХАНИЗМА

Действующей погрешностью кинематической пары называется погрешность размера или формы элементов пары, непосредственно проявляющаяся в работе. Понятие о действующей погрешности, введенное проф. Н. А. Калашниковым, является основой разработанной им теории реальных механизмов.

В высших кинематических парах ввиду последовательного сопряжения поверхностей должна рассматриваться непрерывно действующая погрешность. Она выявляется как функция относительного перемещения детали $\Delta F = f(\varphi)$.

На рис. 75 изображен кулачок, воздействующий на плоский толкатель. На поверхности кулачка имеется избыток металла (на рисунке он заштрихован), вызывающий отклонение в законе перемещения толкателя. Очевидно, что избыточное перемещение толкателя, в данном положении, будет равно величине ΔF , которая отличается от имеющегося увеличения радиуса вектора R . Величина ΔF и является действующей погрешностью пары.

Для нахождения значения и характера изменения действующей погрешности необходимо учитывать, что воздействие между профилями поверхностей элементов кинематических пар происходит по линии действия, проходящей в каждый момент через точку взаимодействия элементов и совпадающей с направлением рабочего усилия. Для шарнирно-звеньевых механизмов эта линия совпадает с направлением оси звена (рис. 76, а); в кулачковых механизмах она направлена по нормали к поверхностям в точке касания кулачка с толкателем (рис. 76, б). Для фрикционных передач линия действия идет по направлению относительной скорости скольжения, т. е. по касательной к профилям (рис. 76, в).

Вследствие погрешностей формы рабочих элементов кинематических пар фактическая линия действия 1 может не совпадать с теоретической линией 2 (рис. 76, г).

Понятия о линии действия и действующей погрешности имеют существенное значение для исследования точности работы механизма; изучения влияния технологических погрешностей, нарушающих процесс производства деталей, и выявления погрешностей при измерении деталей.

Точность измерительных приборов

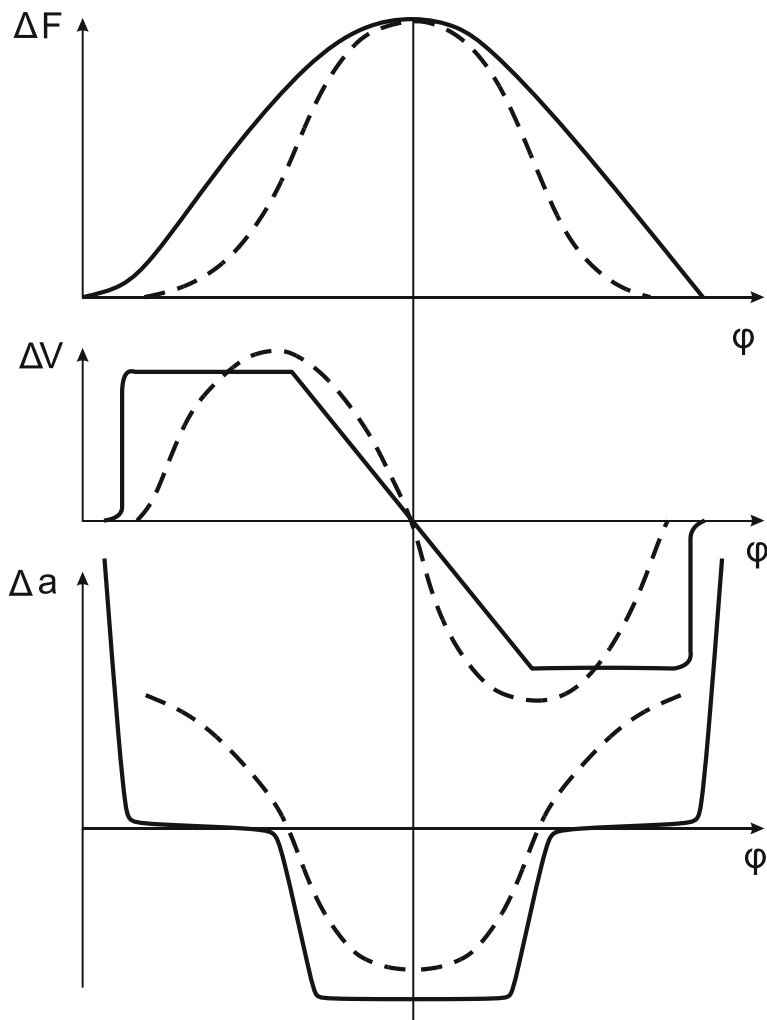


Рис. 78.

Если элемент кинематической пары измеряют измерительным наконечником, выполненным в виде острия и перемещающимся по теоретической линии действия (рис. 77, а), то результаты измерения характеризуют теоретическую погрешность, отличающуюся от действующей.

Действующую погрешность отсчитывают по фактической линии действия и определяют наконечником геометрической

Точность измерительных приборов

формы, аналогичной форме тела, сопряженного с данным элементом (рис. 77, б).

В системе действующей погрешности любой контур или профиль элемента кинематической пары рассматривают как огибающую последовательных положений сопряженного профиля.

В метрологии часто вместо рабочего контура используют обобщенный контур в виде прямой, поскольку в этом случае измерительный наконечник сохраняет постоянную форму и отпадает надобность в изменении его в зависимости от формы профиля сопряженного элемента. Выявляемая погрешность при применении прямолинейного (тангенциального) наконечника мало отличается от действующей погрешности (об этом см. подробнее в.

На рис. 78 показаны графики теоретической (сплошной линией) и действующей (пунктирной линией) погрешностей эвольвентного профиля зубчатого колеса, имеющего погрешность в виде прямолинейного среза, изображенного на рис. 77. По графикам изменения теоретической и действующей погрешностей в зависимости от угла поворота колеса построены графики дополнительных скоростей и ускорений, соответствующие каждой из этих погрешностей. Из графиков видно, что кривые изменения погрешностей не очень резко отличаются между собой и максимумы их совпадают, но кривые изменения скоростей и ускорений отличаются весьма значительно. Поскольку динамические явления, возникающие при работе неточного механизма, оцениваются по изменению скоростей и ускорений, то становится очевидным, что при расчете динамических усилий получаются отличающиеся результаты в зависимости от того, будет ли принята во внимание теоретическая или действующая погрешность.

Для действующей погрешности характерно, что она является комплексной, т. е. погрешностью, отражающей суммарное действие всех погрешностей звена.

При образовании рабочих поверхностей звена ряд причин нарушает технологический процесс. Эти нарушения проявляются в виде непрерывно изменяющихся погрешностей. Технологическая погрешность вносит соответствующие неточности в изготавливаемую деталь, а при эксплуатации звена получившиеся погрешности проявляются в виде подобной же функционально изменяющейся действующей погрешности.

Нередко, при применении элементарных методов контроля функционально действующую погрешность разделяют на отдель-

Точность измерительных приборов

ные погрешности размера, формы и взаимного положения поверхностей.

Комплексную действующую погрешность не следует понимать как полученную в результате суммирования отдельных первичных погрешностей. Наоборот, первичные погрешности должны рассматриваться как частные погрешности общей функциональной действующей погрешности звена, на которые мы ее раскладываем.

Существенно отметить, что поскольку функционально действующая погрешность звена является отражением всех неточностей технологического процесса его изготовления, то анализ этой погрешности позволяет выявить основные нарушения процесса образования поверхности.

Методы исследования влияния погрешностей обработки на функционально действующую погрешность звена и методы установления по действующей погрешности дефектов технологического процесса особенно эффективны применительно к сложным поверхностям, получаемым кинематическим путем (зубчатых колес, ходовых винтов, сложного режущего инструмента, кулачков и т. д.). Следует подчеркнуть, что во всех случаях рассмотрения точности работы механизма, в котором погрешности формы элементов кинематических пар играют существенную роль, когда из-за этого необходимо изучать связь между неточностями технологического процесса и погрешностями изделия, а также если требуется исследовать вопросы динамики работы неточного механизма, все расчеты должны базироваться на функциональных действующих погрешностях звеньев.

47. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ КИНЕМАТИКИ НЕТОЧНОГО МЕХАНИЗМА

Выведем уравнения, характеризующие показатели кинематики неточного механизма, базируясь на методе плеча и линии действия.

Всякий сложный механизм можно разделить на ряд простейших четырехзвенных или трехзвенных механизмов, таких как кривошипно-шатунный, кулачковый, зубчатый и т. п.

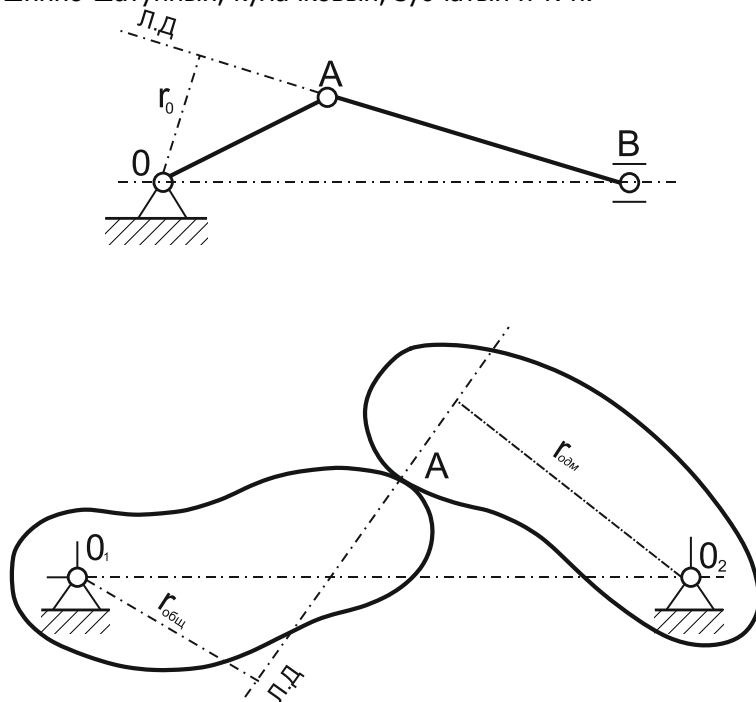


Рис. 79. Кривошипно-шатунный механизм.

За прототип простейшего механизма проф. Н. А. Калашников принимает звено с соответствующей ему линией действия и обобщенное плечо или плечи. В кривошипно-шатунном механизме (рис. 79) линией действия является прямая, совпадающая с осью звена AB , а обобщенным плечом — перпендикуляр к ней, опущенный из точки O вращения кривошипа OA . Длина этого плеча равна r_0 .

В кулачковом механизме линия действия совпадает с нормалью к профилям в точке A их касания, а перпендикуляры,

Точность измерительных приборов

опущенные из O_1 и O_2 на линию действия, соответствуют ведомому ($r_{0\text{ вщ}}$) и ведомому ($r_{0\text{ вв}}$) плечам.

Различные погрешности, возникающие в процессе изготовления и эксплуатации механизма, вызывают общее избыточное приращение по линии действия, состоящее из трех составляющих:

1) приращения ΔF_r , вызванного избыточным изменением обобщенного плеча, вследствие нарушения процесса образования рабочей поверхности и из-за погрешностей подвижных звеньев механизма;

2) приращения $\Delta F_{л.д}$, создаваемого погрешностями, направленными непосредственно по линии действия или параллельно ей и

3) приращения $\Delta F_{н.з}$, создаваемого погрешностями неподвижных звеньев механизма.

Таким образом, общее приращение по линии действия

$$\Delta F_{\Sigma} = \Delta F_r + \Delta F_{л.д} + \Delta F_{н.з}. \quad (49)$$

Рассмотрим отдельно каждую из трех составляющих. Погрешности кинематического процесса образования поверхностей деталей согласно теории реальных механизмов представляют как непрерывное изменение обобщенного плеча δr_0 . Это изменение обобщенного плеча вызывает приращение по линии действия механизма

$$\Delta F_r = \int \delta r_0 d\varphi, \quad (50)$$

где φ — соответствует аргументу, по которому исследуют процесс.

Если исследуют процесс изготовления звена, то можно указать, что действующая погрешность звена есть интеграл погрешности плеча по углу поворота звена.

Для механизма можно выразить приращение плеча через отдельные первичные погрешности всех подвижных звеньев. Приращение плеча δr_0 равно сумме проекций погрешностей подвижных звеньев механизма на обобщенное плечо

$$\delta r_0 = \sum \delta_i \cos \gamma, \quad (51)$$

где δ_i — погрешность размера и формы подвижного звена i ; γ — угол между направлением отсчета погрешности и плечом.

Погрешности подвижных звеньев механизма, направленные вдоль линии действия или параллельно ей, например, отклонение длины шатуна АВ (см. рис. 11.25), непосредственно прибавляют к общему приращению линии действия. Погрешности неподвижных

Точность измерительных приборов

звеньев также проектируют на линию действия и суммируют с остальными составляющими общего приращения линии действия

$$\Delta F_{н.з.} = \Delta_{н.з.} \cos \omega, \quad (52)$$

где $\Delta_{н.з.}$ — погрешность размера и формы неподвижного звена; ω — угол между направлением погрешности неподвижного звена и линией действия.

Подставив выражения для отдельных составляющих в уравнение для общего приращения по линии действия, получаем

$$\Delta F_{\Sigma} = \int \delta r_0 d\varphi + \Delta F_{л.д.} + \Delta_{н.з.} \cos \omega. \quad (53)$$

При суммировании этих трех составляющих следует учитывать знаки для каждого из членов. Знаки устанавливают в зависимости от направления отсчета аргумента, по которому исследуют механизм, направления отсчета координат, положения ведомого звена и воздействия, оказываемого погрешностью на положение ведомого звена механизма.

Для приращения плеча δr_0 знаки выбирают из условия, что если с возрастанием аргумента увеличивается координата положения ведомого звена, то действие положительной погрешности, увеличивающей ведущее плечо, учитывается со знаком плюс, а погрешности, уменьшающие ведущее плечо, — со знаком минус.

С возрастанием аргумента координата ведомого звена			
возрастает		убывает	
при увеличении $\Delta r_{0_{\text{вх}}}$ знак +	при увеличении $\Delta r_{0_{\text{вх}}}$ знак —	при увеличении $\Delta r_{0_{\text{вх}}}$ знак —	при увеличении $\Delta r_{0_{\text{вх}}}$ знак +

Рис. 80.

Если с возрастанием аргумента координата положения ведомого звена уменьшается, то выбирают знаки, обратные указанным выше.

Правило знаков при положительном значении первичных погрешностей для изменений ведущего и ведомых плеч механизма можно записать следующим образом (рис. 80):

Для остальных двух членов, входящих в уравнение общего приращения по линии действия, знаки выбирают в зависимости от влияния положительных значений погрешности на координату положения ведомого звена. Если положительная погрешность уве-

Точность измерительных приборов

личивает координату, определяющую положение ведомого звена механизма, то действие погрешности принимают со знаком плюс.

Для сложных механизмов с несколькими линиями действия избыточное приращение по линии действия, связанной с ведомым звеном, находят путем переноса избыточных приращений по промежуточным линиям действия на эту ведомую линию действия и суммирования всех этих избыточных приращений.

Избыточное приращение с одной линии действия на другую переносят умножением на линейное передаточное отношение между этими линиями действия, т. е.

$$\Delta F_{\text{вм}} = \Delta F_{\text{вщ}} i_f \quad (54)$$

или

$$\Delta F_{\text{вм}} = \Delta F_{\text{вщ}} i \frac{r_{\text{вм}}}{r_{\text{вм}}} \quad (55)$$

Для шарнирно-звеньевых механизмов линейное передаточное отношение между линиями действия может быть найдено из плана скоростей. Оно равно отношению длин перпендикуляров, опущенных из полюса плана скоростей на направления векторов относительных скоростей точек, лежащих на данных линиях действия.

Например, если для механизма, изображенного на рис. 81, известно приращение ΔF_{AB} по линии действия AB, то это приращение, перенесенное на линию действия CD, будет равно ΔF_{CD} , причём

$$\Delta F_{\text{CD}} = \Delta F_{\text{AB}} \frac{Q_{\text{OCD}}}{Q_{\text{OAB}}},$$

где отношение $Q_{\text{OCD}}/Q_{\text{OAB}}$ равно отношению этих отрезков в плане скоростей.

В другом случае погрешность профиля рейки f_r механизма, изображенного на рис. 11.28, направленная по линии действия 1, вызовет перемещение конца стрелки по линии действия 2:

$$\Delta F = f_r i \frac{1}{r_1 \cos 20^\circ} = f_r * 10 \frac{20}{1,6 * 0,94} = 1,33 f_r.$$

При исследовании или расчете точности механизма обычно требуется найти выражение для погрешности положения или перемещения ведомого звена, отсчитываемых по линии его движения. Линия движения в каждый данный момент совпадает с касательной к траектории движения.

Линия движения ведомого звена может не совпадать с линией действия и составлять с ней некоторый угол ϕ .

Точность измерительных приборов

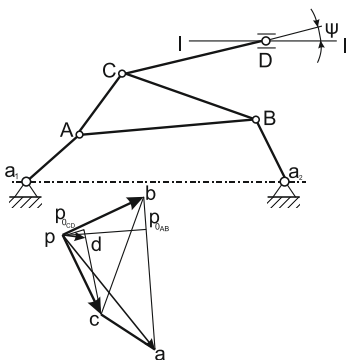


Рис. 81.

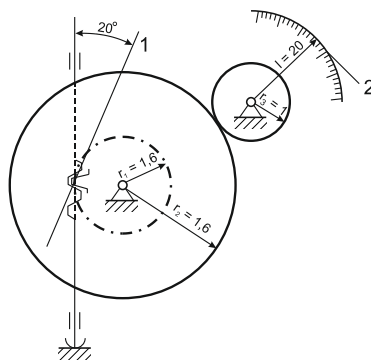


Рис. 82.

Например, в механизме, показанном на рис. 81, точка D ведомого звена движется по горизонтальной направляющей 1—1, а линия действия направлена по CD. Угол между линией движения 1 и линией действия 2 равен ψ .

Приращение по линии движения находят как антипроекцию общего избыточного приращения по линии действия, т. е. делением приращения на косинус угла между линией движения и линией действия

$$\Delta S = \frac{\Delta F_{\Sigma}}{\cos \psi}, \quad (56)$$

где ΔF_{Σ} — приращение по линии действия; ψ — угол между линией движения и линией действия.

Точность измерительных приборов

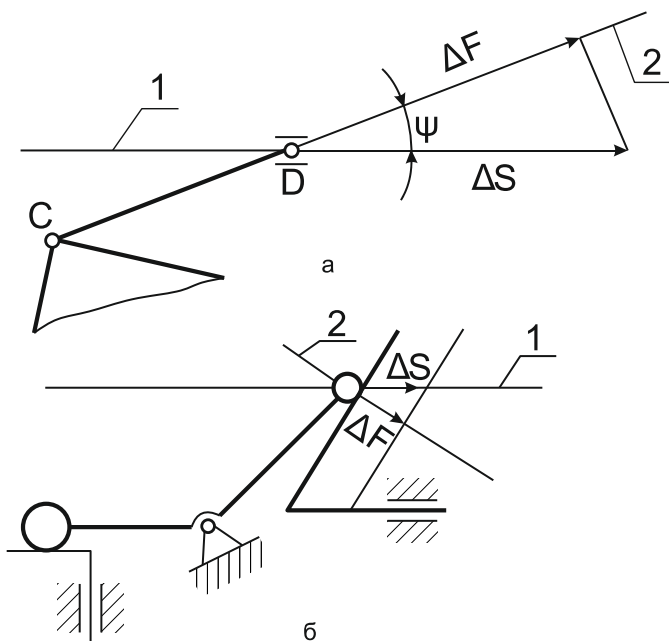


Рис. 83

На рис. 83, а для механизма (см. рис. 81) и рычажного механизма (рис. 83, б) найдены приращения ΔS по линии движения 1 как антипроекция приращения ΔF по линии действия 2.

Из соотношения видно, что приращение по линии движения всегда больше, чем приращение по линии действия, и эти приращения равны между собой только при совпадении их направлений ($\psi = 0$).

Избыточное приращение по линии движения ведомого звена соответствует установленному ранее понятию — погрешность положения механизма (погрешность преобразователя по выходу), хотя следует оговорить, что погрешность положения также включает погрешность схемы механизма. Следовательно, функциональная зависимость погрешности положения механизма, выраженная как функция различных технологических отклонений от аргумента, по которому исследуется механизм, может быть записана в следующем развернутом виде:

$$\Delta S = \Sigma \left[r_0 d\varphi + \Delta F_{л.д.} + \Delta F_{н.з.} \cos\omega \right] \frac{j_F}{\cos\psi}. \quad (57)$$

Таким образом, погрешность положения ведомого звена механизма равна сумме произведений общего приращения

Точность измерительных приборов

по каждой линии действия на линейное передаточное отношение от ведомой линии до данной линии действия и поделенной на косинус угла между линией движения и ведомой линией действия.

Отметим, что отношение $\frac{j_F}{\cos\psi}$ есть также линейное передаточное отношение, но взятое от линии движения ведомого звена до рассматриваемой линии действия. Если для нахождения передаточного отношения от линии движения ведомого звена до линии действия воспользоваться планом скоростей, то оно будет равно отношению отрезка, изображающего в плане скоростей абсолютную скорость ведомого звена к длине перпендикуляра, опущенного из полюса плана скоростей на направление вектора относительных скоростей точек, лежащих на данной линии действия.

Для примера по рис. 81 найдем, что погрешность положения AS ведомого звена D, вызванная приращением ΔF_{ab} по линии действия AB

$$\Delta S = \Delta F_{AB} \frac{pd}{\rho_{O AB}},$$

где pd и $\rho_{O AB}$ — отрезки из плана скоростей.

Представим зависимость погрешности положения механизма (погрешность преобразователя по выходу) по углу поворота ведущего звена, найденную по уравнению (57), в виде кривой (рис. 84).

Если исследуемый механизм используют для дифференциальных измерений, то его настраивают при одном положении ведущего звена — начальном, соответствующем углу ϕ_i , а результаты фиксируют при другом положении ведущего звена — конечном при угле ϕ_k . При дифференциальных измерениях погрешность механизма характеризуется погрешностью перемещения (погрешностью измерения преобразователя по выходу).

В каждом из этих положений действовала своя погрешность положения ΔS_n и ΔS_k . Очевидно, что погрешность перемещения механизма равна разности погрешностей положения в конечном и начальном положениях механизма

$$\Delta S_{пер} = \Delta S_k - \Delta S_n. \quad (58)$$

Для расчета погрешности перемещения механизма необходимо найти для конечного и начального положений механизма

Точность измерительных приборов

общие приращения по линиям действия и, умножив каждое из них на соответствующие передаточные отношения, взять их разность. Общее выражение для погрешности перемещения механизма будет иметь вид

$$\Delta S_{\text{пер}} = \sum \left[\int_0^{\varphi^k} \delta r_0 d\varphi + \Delta F_{\text{л.д.}} + \Delta_{\text{н.з.}} \cos \omega \right]_{\text{кжк}} - \sum \left[\int_0^{\varphi^{\text{н}}} \delta r_0 d\varphi + \Delta F_{\text{л.д.}} + \Delta_{\text{н.з.}} \cos \omega \right]_{\text{нјн}} \quad (59)$$

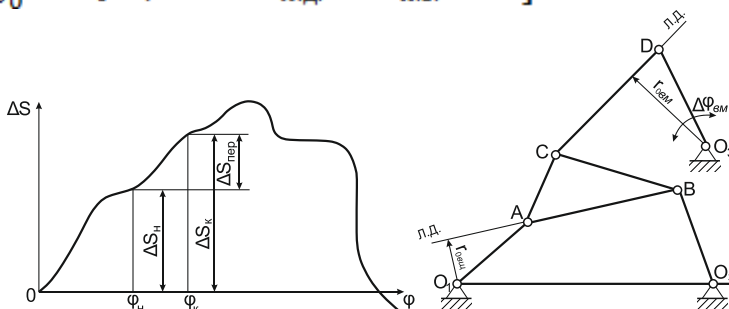


Рис. 84.

Для механизмов, имеющих одну линию действия постоянного направления, например, кулачковых с плоским толкателем или при зацеплении зубчатого колеса с рейкой, линейные передаточные отношения от ведомого звена до линии действия не изменяются при переходе от начального к конечному положению механизма. Если отклонения, направленные вдоль линии действия, остаются также постоянными, то выражение для погрешности перемещения значительно упростится и примет вид

$$\Delta S_{\text{пер}} = \sum \left[\int_0^{\varphi^k} \delta r_0 d\varphi - \int_0^{\varphi^{\text{н}}} \delta r_0 d\varphi \right] j \quad (60)$$

$$\Delta S_{\text{пер}} = j \int_{\varphi^{\text{н}}}^{\varphi^k} \delta r_0 d\varphi \quad (60')$$

Следовательно, для механизмов с постоянным направлением линии действия погрешность перемещения механизма равна разности действующих погрешностей в конечном и начальном положениях, умноженной на линейное передаточное отношение от ведомого звена до линии действия.

Если ведомое звено O_3D (рис. 85) совершает качательное движение вокруг какой-либо неподвижной точки O_3 , то для характеристики погрешности положения или перемещения механизма нужно найти погрешность углового положения или перемещения

этого ведомого звена.

Угловую погрешность положения или перемещения механизма находят как отношение приращения по линии действия в конечном и начальном положениях механизма к соответствующим теоретическим ведомым плечам в этих положениях.

Погрешность углового положения механизма

$$\Delta\varphi_{\text{вм}} = \frac{\Delta F_{\Sigma}}{r_{\text{ОВМ}}} \quad (61)$$

Погрешность углового перемещения механизма

$$\Delta\varphi_{\text{вм.пер}} = \left[\frac{\Delta F_{\Sigma}}{r_{\text{ОВМ}}} \right]_{\text{к}} - \left[\frac{\Delta F_{\Sigma}}{r_{\text{ОВМ}}} \right]_{\text{н}}, \quad (61')$$

где ΔF_{Σ} — общее избыточное приращение по линии действия ведомого звена; $r_{\text{ОВМ}}$ — ведомое плечо механизма.

Для механизмов, имеющих одну постоянно направленную линию действия и постоянные отклонения вдоль линии действия, угловая погрешность механизма может быть найдена из соотношения

$$\Delta\varphi_{\text{вм}} = \frac{1}{r_{\text{ОВМ}}} \int \delta r_0 d\varphi,$$

а угловая погрешность перемещения механизма

$$\varphi_{\text{вм.пер}} = \frac{1}{r_{\text{ОВМ}}} \int_{\varphi_{\text{н}}}^{\varphi_{\text{к}}} \delta r_0 d\varphi$$

Для некоторых исследований имеют значение погрешности передаточного отношения механизма.

Согласно формуле (61') погрешность передаточного отношения

$$\Delta i = i_{\text{д}} - i_0$$

Если развернуть выражение (61) для углового передаточного отношения механизма

$$i = \frac{\Delta\varphi_{\text{ВМ}}}{\Delta\varphi_{\text{ВЩ}}},$$

считая, что угол поворота ведомого звена в действительном механизме равен $\varphi_{\text{вм}} + \Delta\varphi_{\text{вм}}$, получим

$$i_{\text{д}} = \frac{d(\varphi_{\text{ВМ}} + \Delta\varphi_{\text{ВМ}})}{d\varphi_{\text{ВЩ}}} \approx \frac{d\varphi_{\text{ВМ}}}{d\varphi_{\text{ВЩ}}} + \frac{d(\Delta\varphi_{\text{ВМ}})}{d\varphi_{\text{ВЩ}}},$$

откуда

$$i_{\text{д}} = i_0 + \frac{d(\Delta\varphi_{\text{ВМ}})}{d\varphi_{\text{ВЩ}}}$$

Точность измерительных приборов

или, окончательно, погрешность передаточного отношения механизма

$$\Delta i = \frac{d(\Delta\varphi_{\text{вм}})}{d\varphi_{\text{вщ}}}, \quad (62)$$

Согласно формуле (62) первая производная погрешности углового положения механизма по углу поворота ведущего звена соответствует погрешности углового передаточного отношения механизма.

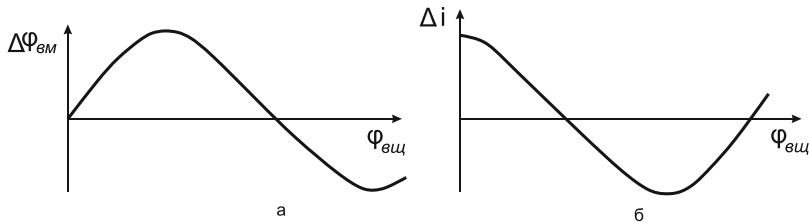


Рис. 86. График изменения угловой погрешности механизма в зависимости от положения ведущего звена

На рис. 86, а показан график изменения угловой погрешности механизма в зависимости от положения ведущего звена. Кривая на рис. 11.32, б, являющаяся производной от функции, показанной на рис. 11.32, а, характеризует изменение погрешности углового передаточного отношения механизма в зависимости от положения ведущего звена.

Аналогично можно найти выражение для погрешности линейного передаточного отношения механизма.

Согласно уравнению (62)

$$i^* = \frac{dS_{\text{вм}}}{dS_{\text{вщ}}},$$

Если принять действительное перемещение ведомого звена механизма равным $S_{\text{вм}} + \Delta S_{\text{вм}}$ при перемещении ведущего звена на $S_{\text{вщ}}$, то можно написать, что

$$i_{\text{д}}^* = \frac{d(S_{\text{вм}} + \Delta S_{\text{вм}})}{dS_{\text{вщ}}} \approx i_0^* + \frac{d(\Delta S_{\text{вм}})}{dS_{\text{вщ}}}$$

или согласно выражению (II.3) погрешность линейного передаточного отношения механизма

Точность измерительных приборов

$$\Delta i^* = \frac{d(\Delta S_{\text{вм}})}{dS_{\text{вщ}}} \quad (63)$$

т. е. погрешность линейного передаточного отношения механизма равна первой производной линейной погрешности положения механизма, взятой по положению ведущего звена.

Несложно найти погрешность скорости ведомого звена механизма, возникающую из-за неточностей, действующих в механизме.

Для этого нужно продифференцировать функциональную погрешность положения механизма по времени

$$\Delta U_{\text{вм}} = \frac{d(\Delta S_{\text{вм}})}{dt} \quad (64)$$

Умножив и разделив (64) на $d\omega_{\text{вщ}}$

$$\Delta U_{\text{вм}} = \frac{d(\Delta S_{\text{вм}})}{dt} \frac{\Delta \varphi_{\text{вщ}}}{d\varphi_{\text{вщ}}},$$

найдем, что погрешность скорости ведомого звена

$$\Delta U_{\text{вм}} = \frac{d(\Delta S_{\text{вм}})}{d\varphi_{\text{вщ}}} \omega_{\text{вщ}}, \quad (64')$$

Где $\omega_{\text{вщ}} = \frac{d\varphi_{\text{вщ}}}{dt}$ - угловая скорость ведущего звена.

Согласно уравнениям (61') и (64) погрешность скорости ведомого звена может быть выражена также и следующей формулой:

$$\Delta U_{\text{вм}} = U_{\text{вщ}} \Delta i^* \quad (65)$$

т. е. при постоянной линейной скорости ведущего звена погрешность линейной скорости ведомого звена пропорциональна изменению общего линейного передаточного отношения механизма.

Погрешность ускорения поступательно движущегося ведомого звена механизма можно найти через погрешность скорости этого звена $\Delta a = \frac{d(\Delta U_{\text{вм}})}{dt} = \frac{d^2(\Delta S_{\text{вм}})}{dt^2}$ или аналогично преды-

$$\text{дущему } \Delta a = \frac{d^2(\Delta S_{\text{вм}})}{d\omega_{\text{вщ}}^2}, \quad (66)$$

т. е. дополнительное ускорение поступательно движущегося ведомого звена механизма равно второй производной функциональной погрешности положения механизма по углу поворота ведущего звена, умноженной на квадрат угловой скорости ведущего звена.

Точность измерительных приборов

При расчете некоторых механизмов используют понятие о коэффициенте неравномерности хода, под которым понимают отношение наибольшего колебания угловой скорости ведомого звена к средней угловой скорости ведомого звена $\delta_\omega = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\text{ср}}}$.

$\omega_{\text{ср}}$

Мгновенные угловые скорости ведомого звена можно выразить через номинальные значения угловой координаты этого звена и погрешность углового положения

$$\omega = \frac{d(\varphi_{\text{ВМ}} - \Delta\varphi_{\text{ВМ}})}{dt} \approx \frac{d\varphi_{\text{ВМ}}}{dt} + \frac{d(\Delta\varphi_{\text{ВМ}})}{dt},$$

Тогда

$$\delta_\omega = \frac{d(\Delta\varphi_{\text{ВМ}})_{\max} - d(\Delta\varphi_{\text{ВМ}})_{\min}}{d\varphi_{\text{ВМ}}}$$

Умножив и разделив это выражение на $d\varphi_{\text{ВШ}}$, получим

$$\delta_\omega = \frac{d(\Delta\varphi_{\text{ВМ}})_{\max} - d(\Delta\varphi_{\text{ВМ}})_{\min}}{d\varphi_{\text{ВМ}}} \frac{\Delta\varphi_{\text{ВШ}}}{\Delta\varphi_{\text{ВШ}}}.$$

Согласно уравнению (62) можно написать, что

$$\delta_\omega = \frac{\Delta i_{\max} - \Delta i_{\min}}{1}, \quad (67)$$

т. е. коэффициент неравномерности хода равен отношению наибольшего колебания передаточного отношения механизма к теоретическому значению передаточного отношения.

В данном параграфе рассмотрены общее приращение по линии действия, погрешность положения и перемещения механизма, угловые погрешности положения и перемещения механизма, погрешности углового и линейного передаточных отношений, погрешности скорости и ускорения ведомого звена, а также коэффициент неравномерности хода.

Все эти показатели точности связаны между собой математически, и их легче всего находят через функциональное выражение для погрешности положения (линейной или угловой) ведомого звена механизма.

48. ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ПОЛОЖЕНИЯ МЕХАНИЗМА МЕТОДОМ ПЛЕЧА И ЛИНИИ ДЕЙСТВИЯ

Ниже рассмотрены примеры определения погрешности положения механизма, с использованием метода и соотношений, изложенных в предыдущем параграфе.

При анализе примем, что действующие погрешности известны как по значению, так и по направлению, т. е. что все погрешности с точки зрения теории вероятности являются систематическими. Методы расчета с учетом случайных значений или функций погрешности излагаются в гл. II.6.

Пример 48.1. Найти погрешность положения синусного механизма (рис. 87), вызванную погрешностью длины рычага Δr , волнистостью рабочей поверхности толкателя и перекосом направляющей Δ_1 вокруг точки D, удаленной от оси рычага O на расстояние H, Волнистость поверхности имеет синусоидальный характер с амплитудой a и длиной волны L, с начальной фазой в точке B.

Отклонение из-за волнистости поверхности

$$y = a \sin 2\pi \frac{l}{L}$$

где l — расстояние от точки B до точки определения волнистости.

При повороте ведущего звена OA на угол α координата ведомого звена S уменьшается.

Отклонение Δr есть погрешность подвижного звена. Она должна проектироваться на плечо OC. Отклонение из-за волнистости направлено параллельно линии действия AC и должно проектироваться на нее.

Перекося направляющей является погрешностью неподвижного звена, и его проявление должно проектироваться на линию действия. $\delta r_0 = -\Delta r \sin \alpha$.

Знак минус взят потому, что с возрастанием аргумента (угла α) координата положения ведомого звена S уменьшается, а положительное отклонение Δr увеличивает ведущее плечо $r_{\text{овц}}$.

Точность измерительных приборов

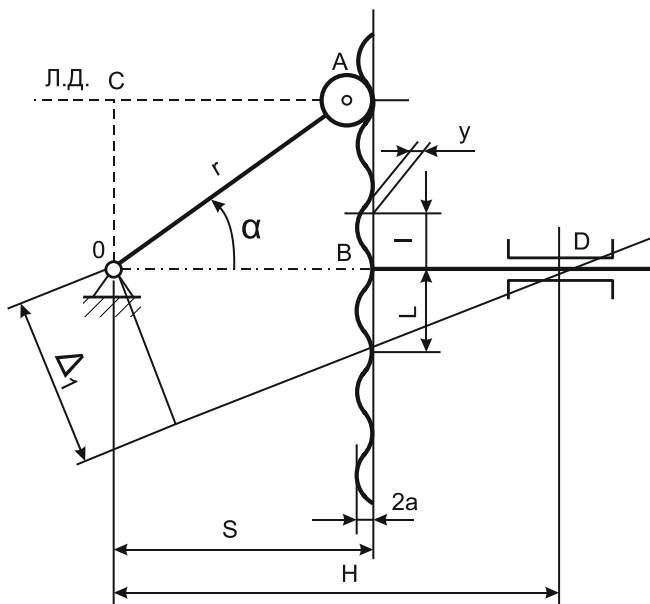


Рис. 87

Приращение по линии действия из-за волнистости рабочей плоскости

$$\Delta F_{\text{л.д.}} = a \sin 2\pi \frac{r \sin \alpha}{L}$$

Знак плюс взят потому, что положительное отклонение из-за волнистости увеличивает координату S ведомого звена.

Приращение по линии действия вследствие перекоса неподвижного звена зависит от соотношения размеров AB и OD ,

$$\Delta F_{\text{н.з.}} = \Delta_1 \frac{r \sin \alpha}{H}$$

Знак плюс принят с учетом того, что рассматриваемое направление перекоса увеличивает расстояние $OB=S$.

Согласно выражению общее приращение по линии действия

$$\Delta F_{\Sigma} = - \int \Delta r \sin \alpha d\alpha + a \sin 2\pi \frac{r \sin \alpha}{L} + \Delta_1 \frac{r \sin \alpha}{H}$$

Приращение по линии движения ΔS равно приращению по линии действия ΔF_{Σ} , так как $\psi=0$, откуда погрешность положения механизма

$$\Delta S = \Delta r \cos \alpha + a \sin 2\pi \frac{r \sin \alpha}{L} + \Delta_1 \frac{r \sin \alpha}{H},$$

а погрешность перемещения

Точность измерительных приборов

$$\Delta S_{\text{неп}} = \Delta r(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) + a \left(\sin 2\pi \frac{r \sin \alpha_2}{L} - \sin 2\pi \frac{r \sin \alpha_1}{L} \right) + \frac{\Delta_1 r}{H} (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1).$$

Пример 48.2. Найти погрешность положения синусной линейки, учитывая отклонения: блока концевых мер A_i , расстояния между осями роликов Δl , размера диаметров роликов Δd_1 и Δd_2 , формы роликов Δr_1 и Δr_2 и непараллельность рабочей поверхности столика и плоскости, касательной к нижней образующей роликов Δ_1 на длине l (рис.88.). При этом погрешность формы ролика 1 имеет выражение

$$\Delta r_1 = a_1 \sin 2\alpha,$$

а ролика 2 — выражение

$$\Delta r_2 = a_2 \sin 2(\alpha + \beta),$$

где $2a_1$ и $2a_2$ — некруглости роликов 1 и 2.

Синусную линейку используют для построения угла α между рабочей поверхностью столика и плоскостью плиты. По известной базовой длине линейки l ($l = 100 - 500$ мм) рассчитывают размер блока плиток b , обеспечивающего построение заданного угла от 0

до 45° , где $\sin \alpha = \frac{b}{l}$.

Погрешностью положения синусной линейки является отклонение $\Delta \alpha$ от расчетного угла α .

Хотя синусная линейка и не является механизмом, к ней можно применить все соотношения для погрешностей механизмов. Поскольку с изменением размера блока плиток b изменяется угол наклона рабочей поверхности линейки α , то можно считать блок плиток ведущим звеном, а синусную линейку — ведомым.

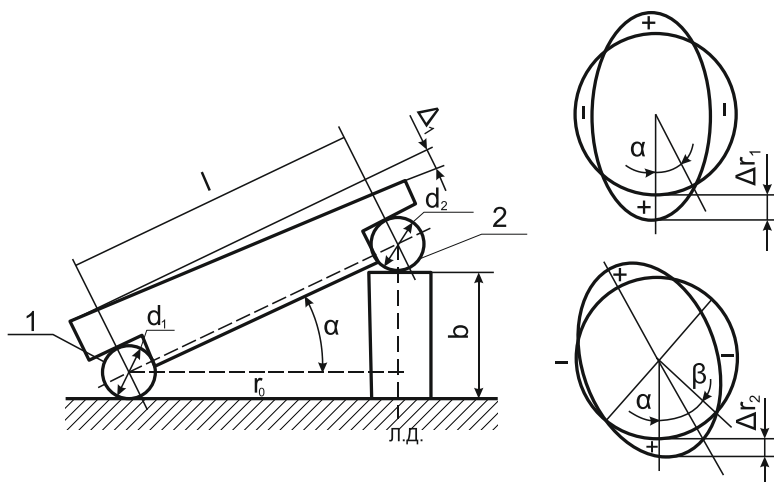


Рис. 88.

Линия действия будет направлена вертикально, а ведомое плечо $r_{\text{овн}}$ — горизонтально.

Отклонение Δb направлено вдоль линии действия; Δl — отклонение подвижного звена; Δd_1 и Δd_2 , Δr_1 и Δr_2 направлены параллельно линии действия; Δ_1 — отклонение подвижного звена.

Общее приращение по линии действия

$$\Delta F_z = \Delta b -$$

$$\int \Delta l \cos \alpha d\alpha - \frac{\Delta d_1}{2} + \frac{\Delta d_2}{2} - a_1 \sin 2\alpha + a_2 \sin 2(\alpha + \beta) + \int \Delta_1 \sin \alpha d\alpha$$

Погрешность углового положения ведомого

$$\Delta \alpha_{\text{вм}} = \frac{\Delta F_z}{r_{\text{овн}}},$$

где ведомое плечо $r_{\text{овн}} = l \cos \alpha$.

Из полученных соотношений находим, что погрешность углового положения рабочей поверхности синусной линейки

$$\Delta \alpha_{\text{вм}} = \frac{1}{l \cos \alpha} \left[\Delta b - \Delta l \sin \alpha - \frac{2d_1}{2} + \frac{2d_2}{2} - a_1 \sin 2\alpha + a_2 \sin 2(\alpha + \beta) - \Delta_1 \cos \alpha \right]$$

Точность измерительных приборов

Поделив почленно, получаем выражение для погрешности углового положения синусной линейки

$$\Delta a_{\text{вм}} = \frac{\Delta b}{l \cos \alpha} + \frac{\Delta l \operatorname{tg} \alpha}{l} + \frac{\Delta d_1 - \Delta d_2}{2l \cos \alpha} + \frac{a_1 \sin 2\alpha - a_2 \sin 2(\alpha + \beta)}{l \cos \alpha} + \frac{\Delta_1}{l}.$$

Из полученного выражения видно, что на погрешность положения синусной линейки влияет разность диаметров парных роликов ($\Delta d_1 - \Delta d_2$), нормируемая в ГОСТ 4046—71, а не отклонение размеров диаметров.

Если при пользовании линейкой вносят поправку по аттестату, найденную при $a = 0$, то в выражении для $AF\%$ нужно брать определенные интегралы с пределами от 0 до a , т. е. рассматривать погрешность перемещения.

49. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИУ

Этот метод часто применяют для определения влияния отклонений различных составляющих величин на выходной сигнал, математически выраженный через величины, входящие в передаточную функцию.

Применительно к исследованию точности ИУ сущность дифференциального метода состоит в составлении уравнения для выходного сигнала в зависимости от величины на входе и в дифференцировании его в частных производных.

Получаемый полный дифференциал равен погрешности ИУ по выходу или погрешности изменения ИУ по выходу.

Если дана функция

$$S = f(x, y, \dots, t),$$

то полный дифференциал

$$dS = \frac{df}{dx} dx + \frac{df}{dy} dy + \dots + \frac{df}{dt} dt,$$

где x, y, \dots, t — независимые переменные.

Полагая, что $\Delta x, \Delta y, \dots, \Delta t$ малы по сравнению с x, y, \dots, t и независимы, можно записать

$$\Delta S = \frac{df}{dx} \Delta x + \frac{df}{dy} \Delta y + \dots + \frac{df}{dt} \Delta t \quad (68)$$

Покажем использование дифференциального метода на примере.

Пример 49.1. Исследование синусно-зубчатого механизма, показанного на рис. Н.6 и 11.35.

Точность измерительных приборов

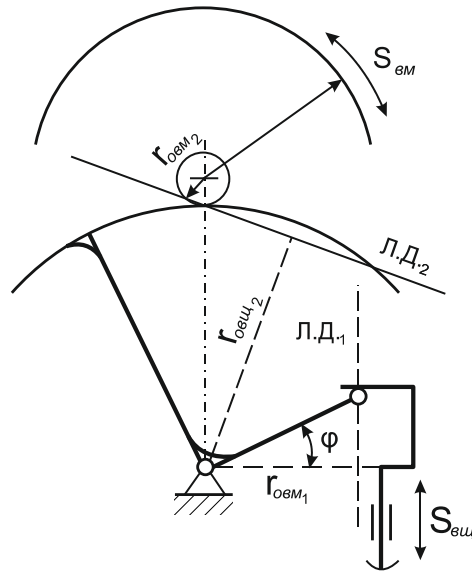


Рис. 89 Синусно-зубчатый механизм

Составим уравнение перемещения механизма. Перемещение ведущего звена вызывает поворот рычага и зубчатого сектора на угол φ

$$S_{\text{вщ}} = a \sin \varphi.$$

Поворот рычага и зубчатого сектора связан с линейным перемещением $S_{\text{вм}}$ конца стрелки прибора выражением

$$S_{\text{вм}} = \varphi \frac{R}{r} l.$$

Продифференцируем оба уравнения в частных производных

$$dS_{\text{вщ}} = \sin \varphi da + a \cos \varphi d\varphi; \quad (a)$$

$$dS_{\text{вм}} = \frac{R}{r} l d\varphi + \varphi \frac{l}{r} dR + \varphi \frac{R}{r} dl - \varphi R l \frac{dr}{r^2}. \quad (б)$$

Из уравнения (а) находим

$$d\varphi = \frac{dS_{\text{вщ}} - \sin \varphi da}{a \cos \varphi}.$$

Подставляя это значение в уравнение (б), получаем

$$dS_{\text{вм}} = \frac{Rl}{ra \cos \varphi} (dS_{\text{вщ}} - \sin \varphi da) + \varphi \frac{l}{r} dR + \frac{R}{r} dl - \varphi R l \frac{dr}{r^2}. \quad (в)$$

Выражение (в) при замене бесконечно малых величин конечными приращениями характеризует погрешность положения ведомого звена. Если, кроме того, в этом выражении принять по-

Точность измерительных приборов

грешность положения ведущего звена $D5_{вщ}$ равной нулю, то будет найдено выражение для погрешности положения механизма

$$\Delta dS_{\text{вм}} = - \frac{Rl}{ar} \operatorname{tg} \varphi \Delta a + \varphi \frac{l}{r} \Delta R + \varphi \frac{R}{r} \Delta l - \varphi R l \frac{dr}{r^2}$$

Сопоставим полученный результат с выражением для погрешности положения механизма, которое определим методом плеча и линии действия, приняв во внимание отклонения Δa , ΔR , Δl и Δr .

Погрешность положения механизма

$$\Delta S_{\text{вм}} = \Delta F_1 j_1 + \Delta F_2 j_2 + \Delta S'_{\text{вм}},$$

где $\Delta F_1 := \int \Delta a \cos \varphi d\varphi$ — приращение по линии действия 1 (знак минус взят потому, что рассматривается приращение ведомого плеча);

$j_1 = \frac{R^l}{\arccos \varphi}$ — линейное передаточное отношение от ведомого звена до линии действия 1;

$\Delta F_2 := \int \Delta R \cos \alpha d\varphi - \int \Delta R \cos \alpha \frac{R}{r} d\varphi$ — приращение по линии действия 2;

$j_2 = \frac{l}{r \cos \alpha}$ — передаточное отношение для линии действия;

$\Delta S'_{\text{вм}} = \Delta l \frac{\varphi R}{r}$ — погрешность из-за отклонения длины стрелки.

При интегрировании принимаем значения Δa , ΔR и Δr — постоянными, аналогично тому, как это было сделано для дифференциального метода.

После подстановки всех найденных значений найдем погрешность положения механизма

$$\Delta S_{\text{вм}} = - \frac{Rl}{\arccos \varphi} + (\Delta R \cos \alpha \varphi - \Delta r \cos \alpha \varphi \frac{R}{r}) \frac{1}{r \cos \alpha} + \Delta l \frac{\varphi R}{r} \sin \varphi$$

После преобразования получаем

$$\Delta S_{\text{вм}} = - \frac{Rl}{ar} \operatorname{tg} \varphi \Delta a + \varphi \frac{l}{r} \Delta R - \varphi R l \frac{\Delta r}{r^2} + \varphi \frac{R}{r} \Delta l$$

Как видно, результат, найденный по этим двум методам, совершенно одинаков, что и следовало ожидать.

Дифференциальный метод проще и не требует каких-либо

Точность измерительных приборов

дополнительных построений. Однако, пользуясь этим методом, необходимо составлять уравнения передаточной функции, положения мл и перемещения механизма, что во многих случаях практически затруднительно. Кроме того, в формулу полного дифференциала входят лишь значения параметров, определяющих передаточную функцию ИУ при точном выполнении, поэтому погрешности нулевых параметров, таких как отклонения формы элементов пар и неточности в расположении элементов, не входят в уравнение погрешности-положения механизма или погрешности ИУ по выходу.

Указанные недостатки дифференциального метода ограничивают его применение при исследовании сложных ИУ, в которых существенное значение имеют погрешности формы кинематических элементов и их взаимное положение (непараллельность, несоосность, перекос и т. д.) или не учитываемая в основном уравнении взаимоиндуктивность, дополнительная проводимость и т. д.

50. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕТОДОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СХЕМЫ

Метод преобразованного механизма совместно с принципом рассмотрения первичных погрешностей является основой теории точности механизмов, разработанной акад. Н. Г. Бруевичем. Применительно к ИУ вопрос об их точности рассматривается следующим образом. Выходной сигнал теоретического ИУ определяется уравнением

$$S_{\text{вм.о}} = f_0(q_n),$$

где q_n — параметры, входящие в уравнение выходной функции (для механизмов длина звеньев; координаты, определяющие положение ведущего звена, и т. п.).

Для действительного ИУ выходная функция определяется уравнением.

$$S_{\text{вм.д}} = f(q_n + \Delta q_n),$$

где Δq_n — первичные погрешности для механизма и цепи.

Погрешность ИУ на выходе, обусловленная выбранной схемой и первичными погрешностями, определяется разностью

Эта функция, в общем случае, сложная, т. е. не линейна.

Разлагая это уравнение в ряд Тэйлора по степеням Δq_n и ограничиваясь лишь членами, содержащими Δq_n в нулевой и первой степени, находим приближенное выражение

$$S_{\text{вм.д}} \approx f(q_n) + \sum_n \left(\frac{ds}{dq_n} \right)_0 \Delta q_n.$$

Первый член этого выражения $f(q_n)$ отличается от $f(q_n)$ на значение погрешности схемы на выходе.

Второй член соответствует уравнению для погрешности ИУ на выходе

$$\Delta S \approx \sum_n \left(\frac{ds}{dq_n} \right)_0 \Delta q_n. \quad (69)$$

т. е. погрешность ИУ на выходе зависит от первичных погрешностей и коэффициента влияния для них. Полученная приближенная формула выражает зависимость погрешности ИУ как линейную функцию первичных погрешностей — скалярных и модулей векторных, поскольку при ее выводе были отброшены члены, содержащие первичные погрешности во второй и более высокой степени. В нелинейной теории точности учитывают также влияние последующих членов разложения, содержащих Δq_n во второй и более высоких степенях.

Точность измерительных приборов

Уравнение (69), найденное также из условия независимости погрешностей Δq_n , использует правило суперпозиции.

Применительно к механическим приборам передаточное отношение $\left(\frac{dS}{dq_n}\right)_0$ в уравнении погрешности ИУ есть отношение малого перемещения ведомого звена к значению первичной погрешности, вызвавшей это перемещение при отсутствии других отклонений.

В теории точности механизмов доказывается, что для получения погрешности механизма не требуется составлять уравнение движения действительно существующего механизма, имеющего неточные размеры звеньев, неправильности поверхностей кулачков, зазоры в шарнирах, проскальзывание во фрикционах и другие первичные погрешности. Оказывается также излишним разлагать уравнение в ряд Тэйлора по параметрам и независимым переменным, имеющим неточности.

Использованием предложенного понятия о преобразованном механизме была снята существенная трудность вычисления погрешности механизма в зависимости от его первичных погрешностей.

Показано, что передаточное отношение $\left(\frac{dS}{dq_n}\right)_0$ имеет следующий механический смысл: оно есть отношение малых перемещений ведомого и ведущего звеньев преобразованного механизма.

Преобразованным механизмом называется механизм с точно выполненными звеньями, у которого ведущие звенья закреплены (сделаны неподвижными), а звенья, имеющие погрешность, преобразованы в ведущие звенья с направлением движения, совпадающим с направлением рассматриваемой первичной погрешности.

Указанное свойство частной производной позволяет находить ее графически и затем определять для нее аналитическое выражение. Для определения передаточного отношения строят картину малых перемещений преобразованного механизма.

В теории точности разработан также метод, позволяющий найти неточность в определении погрешности механизма, обусловленную переходом от точной формулы к приближенной линейной. Для этого не требуется знать уравнение действительно существующего механизма. Это позволяет в сомнительных слу-

Точность измерительных приборов

чаях подсчитать погрешность и выяснить допустимость пользования приближенной линейной формулой.

Согласно теории точности выражение для погрешности положения механизма в принятых нами обозначениях имеет вид

$$\Delta S = \Delta S_{\text{сх}} + \sum_n \left(\frac{dS}{dq_n} \right)_0 \Delta q_n + \Delta S_{\text{кач}}, \quad (69')$$

где $\Delta S_{\text{сх}}$ — погрешность схемы механизма; Δq_n — первичные погрешности механизма (скалярные и векторные), действующие в текущем положении механизма; $\sum_n \left(\frac{dS}{dq_n} \right)_0$ —

коэффициент влияния первичной погрешности Δq_n на погрешность положения механизма (его находят из преобразованного механизма); $\Delta S_{\text{кач}}$ — погрешность механизма, возникающая вследствие проскальзывания во фрикционах, неправильности поверхностей элементов кинематических пар качения, неправильностей поверхностей кулачков, на которые навиваются гибкие нити и ленты.

Рассмотрим некоторые примеры определения погрешности положения механизма с использованием метода преобразованного механизма.

Пример 50.1. На рис. 11.36. о, представлен кривошипный механизм, имеющий отклонения в длине кривошипа $OA \Delta r$, длине шатуна $AB \Delta l$ и размере a дезаксиала Δa . Требуется найти погрешность положения Δr ведомого звена — ползушки B , возникающую вследствие этих отклонений.

Точность измерительных приборов

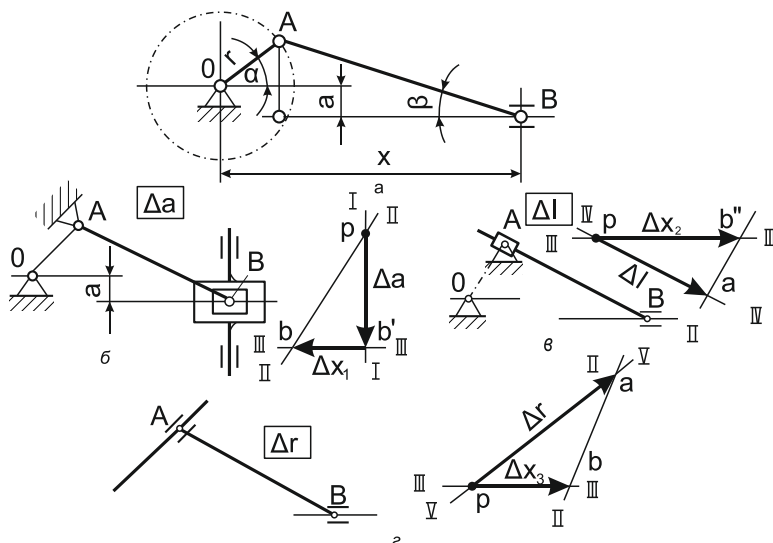


Рис. 90. Кривошипный механизм.

Для определения передаточного отношения отклонения дезаксиала Δa строим преобразованный механизм. Сущность его построения заключается в закреплении ведущего звена OA и создании нового ведущего звена, позволяющего изменять дезаксиал a , т. е. имеющего перемещение в направлении отсчета отклонения. На рис. 90, б показан подобный преобразованный механизм. В нем звено OA неподвижно, а направляющая, по которой двигалась ползушка B , имеет возможность перемещаться вверх и вниз, благодаря чему изменяется дезаксиал a . Преобразованный механизм соответствует механизму поступательной кулисы.

Строим картину малых перемещений. Для этого из произвольной точки p — полюса проводим луч $I-I$, перпендикулярный направлению движения "ползушки" B . Откладываем на нем в произвольном масштабе отрезок Δa . Проводим из точки p луч $II-II$, перпендикулярный линии AB шатуна. Из точки B^1 проводим луч $III-III$, параллельный движению ползушки B , до его пересечения в точке b с лучом $II-II$. Отрезок $b'b$ есть погрешность положения Δx_1 точки B механизма, вызванная отклонением Δa . Очевидно, что масштаб отрезков Δa и Ax_1 один и тот же.

Из треугольника $pb'b$, учитывая, что угол bpb' равен углу β , находим

$$\Delta x_1 = \Delta a \operatorname{tg} \beta .$$

Знак минус взят потому, что положительное отклонение

Точность измерительных приборов

размера a уменьшает величину x .

Таким образом, с помощью преобразованного механизма и картины малых перемещений найдено соотношение между погрешностью положения механизма и первичной погрешностью.

Для определения передаточного отношения для отклонения Δt длины шатуна AB строим преобразованный механизм (рис. 11.36, е), в котором звено OA закреплено, а звено AB может изменять свою длину l , что соответствует тангенсному механизму.

Строим картину малых перемещений. Из точки p проводим луч $IV-IV$, параллельный направлению AB отсчета первичной погрешности Δl , и откладываем на нем это отклонение. Из точки a конца отрезка At проводим луч $II-II$, перпендикулярный AB , а из точки p — луч $III-III$ параллельно движению ползушки B , до их пересечения в точке δ . Полученный отрезок pb изображает в масштабе погрешность положения ведомого звена B , вызванную первичным отклонением Δl .

Соотношение между этими погрешностями можно выразить математически, учитывая, что угол \arcb' равен углу β

$$\Delta x_2 = \frac{\Delta l}{\cos \beta}.$$

Знак плюс взят потому, что положительная погрешность размера l увеличивает координату x .

Передаточное отношение для отклонения Δr длины кривошипа может быть также найдено из преобразованного механизма (механизма эллипсографа), у которого звено OA закреплено (рис. 11.36, г). Длина OA может изменяться.

Из точки p — картины малых перемещений проводим луч $V-V$, параллельный OA , и откладываем на нем отрезок pa , изображающий в масштабе отклонение Δr в длине кривошипа OA . Через точку a проводим луч $II-II$ до пересечения с лучом $III-III$ в точке b . Отрезок pb в масштабе изображает погрешность Δx_3 положения ведомого звена B , вызванную первичной погрешностью.

Учитывая, что угол \arcb равен углу α , а угол \rab равен $90 - (\alpha + \beta)$ на основании теоремы синусов, можно написать

$$\frac{\Delta x_3}{\Delta r} = \frac{\sin[90 - (\alpha + \beta)]}{\sin(90 + \beta)}.$$

или после преобразований

$$\Delta x_3 = \Delta r \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta}.$$

Общая погрешность положения механизма, вызванная тре-

Точность измерительных приборов

мя рассмотренными первичными отклонениями,

$$\Delta x_{\Sigma} = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3$$

или

$$\Delta x_{\Sigma} = -\Delta a \operatorname{tg} \beta + \frac{\Delta l}{\cos \beta} + \frac{\Delta r \cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta}.$$

Сопоставим результат, полученный методом преобразованного механизма, с зависимостями, который найдем дифференциальным методом.

Уравнения положения механизма согласно рис. 90, а могут быть записаны

$$x = r \cos \alpha + l \cos \beta$$

$$r \sin \alpha + a = l \sin \beta. \quad (\text{а})$$

Продифференцируем их в частных производных

$$dx = dr \cos \alpha - r \sin \alpha d\alpha - dl \cos \beta - l \sin \beta d\beta.$$

$$dr = dr \sin \alpha + r \cos \alpha d\alpha + da = dl \sin \beta + l \cos \beta d\beta.$$

Заменив дифференциалы конечными приращениями, получим

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= \Delta r \cos \alpha, - r \sin \alpha \Delta \alpha + \Delta l \cos \beta - l \sin \beta \Delta \beta \\ \Delta r \sin \alpha + r \cos \alpha \Delta \alpha + \Delta \alpha &= \Delta l \sin \beta + l \cos \beta \Delta \beta \end{aligned} \right\}$$

(б)

Пользуясь принципом независимого действия первичных погрешностей (суперпозиции) для нахождения связи между Δx и Δa , примем в уравнениях (б) все остальные первичные отклонения равными нулю, т. е. $\Delta a=0$; $\Delta r=0$ и $\Delta l=0$

Тогда

$$\Delta x = -l \sin \beta d\beta$$

и

$$\Delta a = l \cos \beta d\beta,$$

откуда

$$\Delta \beta = \frac{\Delta a}{l \cos \beta}$$

и

$$\Delta x = -\frac{l \Delta a \sin \beta}{l \cos \beta}$$

или окончательно

$$\Delta x = -\Delta a \operatorname{tg} \beta. \quad (\text{в})$$

Аналогично для выяснения влияния первичного отклонения

Δl положим в уравнениях (б) $\Delta \alpha = 0$; $\Delta a=0$ и $\Delta r = 0$.

Тогда

Точность измерительных приборов

$$\Delta x = \Delta l \cos \beta - l \sin \beta \Delta \beta$$

и

$$\Delta l \sin \beta + l \cos \beta \Delta \beta = 0$$

Выразив $\Delta \beta$ из второго соотношения

$$\Delta \beta = - \frac{\Delta l \sin \beta}{\Delta l \cos \beta}$$

и подставив его в первое соотношение, получим

$$\Delta x = \Delta l \cos \beta + \frac{\sin^2 \beta}{\cos \beta} \Delta l .$$

Поделив всю правую часть последнего выражения на $\cos \beta$, находим

$$\Delta x = \frac{\Delta l}{\cos \beta} (\cos^2 \beta + \sin^2 \beta)$$

или окончательно

$$\Delta x = \frac{\Delta l}{\cos \beta} . \quad (\text{г})$$

Для определения влияния первичного отклонения Δr на погрешность положения механизма примем в уравнениях (б) $\Delta \alpha = 0$; $\Delta a = 0$ и $\Delta l = 0$.

Тогда

$$\Delta x = \Delta r \cos \alpha - l \sin \beta \Delta \beta; \quad (\text{д})$$

$$\Delta r \sin \alpha = l \cos \beta \Delta \beta \quad (\text{е})$$

Из соотношения (е)

$$\Delta \beta = \frac{\Delta r \sin \alpha}{l \cos \beta} .$$

Подставляя $\Delta \beta$ в выражение (д), находим

$$\Delta x = \Delta r (\cos \alpha - \sin \alpha \operatorname{tg} \beta) .$$

Поделив на $\cos \beta$, получим

$$\Delta x = \frac{\Delta r}{\cos \beta} (\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta)$$

или окончательно

$$\Delta x = \frac{\Delta r}{\cos \beta} \cos(\alpha + \beta) .$$

Как видно из рассмотрения полученных результатов, соотношения, найденные методом преобразованного механизма и дифференциальным методом по выражениям (в), (г), (ж), полностью совпадают.

Пример 51.2. Найти погрешность положения качающегося рычага ΔL , плоского кулачкового механизма (рис. 91, а), появля-

Точность измерительных приборов

ющуюся вследствие первичных отклонений: ΔQ_2^n — отклонения профиля кулачка 2, отсчитываемого по нормали к его поверхности; ΔQ_4^n — отклонения радиуса ролика 4 и Δl_3 — отклонения длины качающегося рычага BC.

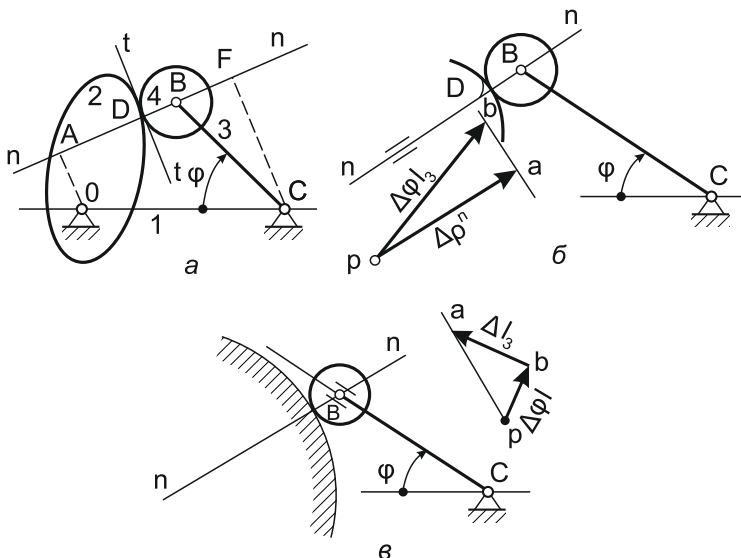


Рис. 91. Плоского кулачковый механизм.

Поскольку оба отклонения направлены по нормали к профилю кулачка в точке D, то преобразованный механизм можно строить для одного отклонения ΔQ^n , равного сумме двух. На рис. 91, б показаны соответствующий преобразованный механизм и картина малых перемещений. Ведущее звено механизма кулак — оставлено, но предусмотрено его движение в направлении первичного отклонения ΔQ^n . В картине малых перемещений pa параллельно нормали pp и является первичным отклонением ΔQ^n . Линия ab направлена параллельно касательной U (см. рис. 91, а), проведенной в точке D касания кулака и ролика; линия rb проведена из точки p перпендикулярно к линии BC механизма. Отрезок rb в масштабе соответствует произведению отклонения $\Delta \phi$ углового положения качающегося рычага на длину рычага l3.

Если в картине малых перемещений измерить отрезки pa и rb, можно найти погрешность $\Delta \phi$

Точность измерительных приборов

$$\frac{\Delta\varphi l_3}{\Delta\rho^n} = \frac{\overline{p\bar{b}}}{\overline{p\bar{a}}},$$

откуда

$$\Delta\varphi = \Delta\rho^n \frac{\overline{p\bar{b}}}{l_3 \overline{p\bar{a}}}.$$

При этом следует учесть, что картина малых перемещений может быть вычерчена очень крупно, благодаря чему отношение $\overline{p\bar{b}} : \overline{p\bar{a}}$ сможет быть найдено с необходимой точностью.

Если воспользоваться методом плеча и линии действия, то легко увидеть, что погрешность углового положения ведомого звена

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta\rho^n}{CF},$$

где $\Delta\rho^n$ — приращение по линии действия; CF — радиус ведомого плеча.

Из подобия треугольников BCF и bpa можно найти, что

$$\frac{CF}{l_3} = \frac{\overline{p\bar{b}}}{\overline{p\bar{a}}}, \text{ т.е. } \overline{CF} = \frac{l_3 \overline{p\bar{a}}}{\overline{p\bar{b}}}.$$

Таким образом, результат при решении вопроса двумя методами получается тождественным.

На рис. 91, в построен преобразованный механизм для отклонения Δl_3 . В картине малых перемещений pd параллельно tt (см. рис. 91, а); pb перпендикулярно BC и bd параллельно BC. Найдя отношение отрезков pb и bd из картины малых перемещений, запишем

$\frac{\Delta\varphi l}{\Delta l_3} = \frac{\overline{p\bar{b}}}{\overline{b\bar{d}}}$, откуда погрешность углового положения ведомого звена механизма из-за отклонения длины качающегося

рычага $\Delta\varphi = \Delta l_3 \frac{\overline{p\bar{b}}}{l \overline{b\bar{d}}}$.

В некоторых случаях для определения погрешности положения механизма удобно воспользоваться одновременно дифференциальным методом и методом преобразованного механизма. С помощью закона движения ведомого звена, составленного для точного механизма, можно найти погрешность положения, происходящую вследствие первичных отклонений параметров, входящих в формулу движения ведомого звена. Погрешности положения из-за прочих первичных отклонений могут быть определены с помощью преобразованных механизмов и картин малых переме-

Точность измерительных приборов

щений. Полная погрешность положения ведомого звена равна сумме всех перечисленных погрешностей положения.

Оценивая метод преобразованного механизма и картины малых перемещений необходимо указать, что:

1) метод не требует составления основного уравнения движения механизма, что позволяет применять метод для исследования сложных шарнирно-звеньевых механизмов;

2) применение преобразованных механизмов и картин малых перемещений значительно облегчают нахождение влияния первичного отклонения на погрешность положения механизма. Благодаря наглядности метод гарантирует отсутствие грубых погрешностей при отыскании передаточного отношения;

3) метод трудно применим для учета функциональной действующей погрешности кинематической пары; погрешности звеньев принимаются постоянными, что затрудняет рассмотрение погрешностей скоростей и ускорений;

4) метод лучше всего применять для шарнирно-звеньевых механизмов, в которых погрешности формы поверхностей существенно не влияют на работу механизма.

Для электрических цепей также был разработан метод преобразованной цепи [11.15], являющийся развитием метода преобразованного механизма. Он позволяет находить коэффициенты влияния для отдельных первичных погрешностей аналитически, а также путем опытного моделирования без составления уравнения для выходного напряжения.

Для электрических цепей, работающих в установившемся режиме, необходимо отдельно проанализировать точность цепей с омическими элементами (R -цепи) и точность цепей с реактивными элементами.

Цепи с омическими элементами

На основании теоремы о суперпозиции выходное напряжение линейной электрической цепи, состоящей из омических элементов и включающей в себя n источников питания с э.д.с. E_1, E_2, \dots, E_n

$$U = E_1 \varphi_1(q_1 \dots q_m) + E_2 \varphi_2(q_1 \dots q_m) + \dots + E_n \varphi_n(q_1 \dots q_m),$$

где $q_1 \dots q_m$ — параметры цепи; $\varphi_1 \dots \varphi_m$ — передаточная функция от данного источника питания к выходным полюсам.

В случае одного источника питания $U = E \varphi(q_1 \dots q_m)$.

В данном случае под передаточной функцией понимается

Точность измерительных приборов

отношение напряжения на выходных полюсах цепи к напряжению на входных полюсах.

Погрешность выходного напряжения цепи определяют по формуле

$$\Delta U = E(\varphi - \varphi_0)_0 + E \sum_{n=1}^m \left(\frac{d\varphi}{dq_n} \right)_0 \Delta q_n + \Delta E\varphi_0, \quad (70)$$

где $E(\varphi - \varphi_0)_0$ — погрешность схемы (структурная погрешность); $E \sum_{n=1}^m \left(\frac{d\varphi}{dq_n} \right)_0 \Delta q_n$ — погрешность цепи вследствие неточностей в параметрах q_n и $\Delta E\varphi_0$; $\Delta E\varphi_0$ — погрешность источника питания; φ_0 — передаточная функция (характеристика) теоретической цепи; $\left(\frac{d\varphi}{dq_n} \right)_0 = j_n$ — частные производные (коэффициенты влияния первичных погрешностей на погрешность выходного напряжения).

В этом случае погрешность ΔU рассматривается как линейно зависящая от первичных неточностей, независимых между собой.

Рассматривая действие каждой неточности отдельно, считая все остальные элементы выполненными идеально точно, найдем

$$\Delta U = \left(\frac{d\varphi}{dq_n} \right) \Delta q_n$$

или

$$\Delta U = E j_n \Delta q_n \quad (71)$$

Для цепи, состоящей из омических сопротивлений $\Delta q_n = \Delta R_n$, т. е. погрешности сопротивления или же $\Delta q_n = \Delta A_n$, т. е. дополнительной малой проводимости.

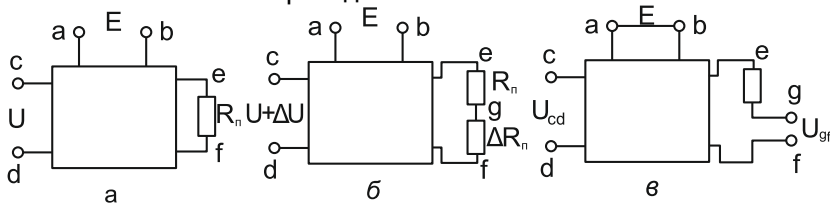


Рис. 92

Коэффициент влияния j_n может быть вычислен одним из двух способов: или составлением передаточной функции цепи с последующим нахождением частной производной по q_n , или же методом преобразованной цепи.

Преобразованная цепь для данной первичной по-

Точность измерительных приборов

грешности получается из точной цепи (принята в схеме) путем закорачивания полюсов источника питания и образования новой пары полюсов в месте существования изучаемой погрешности. Если внутреннее сопротивление источника питания не равно нулю, то взамен закорачивания полюсов источника в этом месте необходимо включить сопротивление, равное его внутреннему сопротивлению.

На рис. 92, а показана электрическая цепь без погрешностей, а на рис. 92, б — действительная цепь, в которой сопротивление R_n имеет погрешность ΔR_n . Для нахождения погрешности выходного напряжения ΔV следует определить коэффициент влияния jR_n по формуле

$$jR_n = \left(\frac{d\varphi_{ab,cd}}{dR_n} \right)_0 = \frac{1}{R_n} \varphi_{ab,ef} \varphi_{gf,cd}. \quad (72)$$

Таким образом, для определения коэффициента влияния необходимо найти две передаточные функции: изучаемой цепи на участке от входа до места нахождения первичной погрешности $\varphi_{ab,ef}$ (рис. 11.38, а) и преобразованной $\varphi_{gf,cd}$ (рис. 11.38, в). При этом в обоих случаях цепи рассматриваются без погрешностей.

Преобразованная цепь может быть использована как для аналитического, так и для экспериментального определения коэффициента влияния. В последнем случае нужно измерить пару напряжений U_{ef} и E в исследуемой цепи и взять их отношение

$\varphi_{ab,ef} = \frac{U_{ef}}{E}$, затем создать преобразованную цепь и измерить

также два напряжения в ней U_{gf} и E . Их отношение $\varphi_{gf,cd} = \frac{U_{cd}}{U_{gf}}$.

Произведение отношений и множителя $1/R_n$ даст искомый коэффициент влияния j_n .

Практически один экземпляр системы может быть использован для создания всех необходимых преобразованных цепей для различных неточностей и служить счетно-решающим устройством для расчета точности системы, При этом можно изменять и размеры входных параметров с целью установления их влияния, а напряжения измерять сравнительно грубыми приборами.

Если погрешность носит характер дополнительной малой проводимости ΔA_n , то коэффициент влияния

$$j\Delta A_n = \left(\frac{d\varphi_{ab,cd}}{d\Delta A_n} \right)_0 = \frac{1}{A_n} \varphi_{ab,ef} \varphi_{gf,cd}. \quad (73)$$

Пример 50.3. Определить коэффициент влияния для дополнительной малой проводимости ΔL , между точками ef делителя напряжения (рис. 11.39, а).

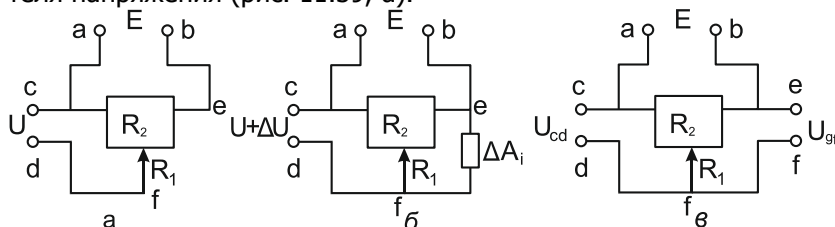


Рис. 93

На рис. 93, б изображена действительная цепь, в которой между точками ef включена дополнительная малая проводимость ΔL ; а на рис. 11.39, в показана преобразованная цепь с источником питания между контактами ef и замкнутая между контактами ab .

Коэффициент влияния для погрешности ΔL^* определяют по формуле (11.27), где точка e совпадает с b , а f с точкой d

$$i_{\Delta A_i} = \left(\frac{d\varphi_{ab,cd}}{d\Delta A_i} \right)_0 = - \frac{1}{A_i} \varphi_{ab,bd} \varphi_{bd,cd}$$

Из схемы находим

$$\varphi_{ab,bd} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Из преобразованной цепи

$$\varphi_{bd,cd} = \frac{U_{cd}}{U_{bd}} = -1.$$

Проводимость между точками d и b преобразованной цепи

$$A = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Подставляя все три соотношения в формулу для $j_{\Delta A_i}$, получим

$$i_{\Delta A_i} \frac{\frac{R_1}{(R_1 + R_2)}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1^2 R_2}{R_1 + R_2}$$

В данном случае, пример решен аналитическим, а не экспериментальным путем.

Цепи с реактивными элементами

Электрические цепи с реактивными элементами содержат кроме омических сопротивлений R , емкости C , индуктивности L и взаимные индуктивности M . Подобные цепи описываются не конечными, а дифференциальными уравнениями, в чем их основное отличие от цепей с омическими сопротивлениями.

Погрешность цепей с реактивными элементами определяется как погрешностью в элементах и дополнительными паразитными параметрами, так и видом входного сигнала (возбуждения), т. е. здесь возникает не статическая, а динамическая погрешность. Дифференциальные уравнения, определяющие работу цепей с реактивными элементами в установившемся режиме при синусоидальном входном сигнале, легко сводятся к алгебраическим, и точность таких цепей можно определить, пользуясь методами, аналогичными примененным для цепей с омическими сопротивлениями.

Все напряжения или токи в цепях с реактивными элементами, питающимися синусоидальными э. д. с. постоянной частоты, определяются их амплитудными значениями и сдвигом по фазе относительно некоторого источника, принятого за основной. Эти напряжения и токи можно представлять символически в виде комплексных чисел, действительная ось которых (т. е. начало отсчета) определяется напряжением выбранного основного источника питания. Кроме того, различные сопротивления Z переменному току могут быть представлены в виде комплексных чисел, у которых отношение мнимой части к действительной есть тангенс угла сдвига фазы между током, протекающим по этому сопротивлению, и падением напряжения на нем. Таким образом,

омическое сопротивление $Z_R=R$, сопротивление емкости $Z_C=\frac{1}{j\omega C}$

сопротивление индуктивности $Z_L=j\omega L$, где $j=\sqrt{-1}$. Соответствующие

проводимости суть обратные величины $I_H=\frac{1}{R}$; $I_C=j\omega C$;

$I_L=\frac{1}{j\omega L}$.

При этом формулы (74) и (76) остаются в силе, но следует только иметь в виду, что входящие в них члены: напряжения, сопротивления, проводимости и передаточные функции, являются комплексными величинами, подчиняющимися правилам

Точность измерительных приборов

комплексной алгебры. Что касается источников погрешностей, то для отклонения в омическом сопротивлении $\Delta q_n = \Delta R_n$; для отклонения в омической проводимости $\Delta q_n = \Delta A_n$; отклонение в емкости $\Delta q_n = -j\Delta C_n$, т. е. выражается в виде дополнительной малой проводимости A/c_n ; отклонение в индуктивности — в, виде $\Delta q_n = j\omega\Delta L_n$ и т. п.

Для определения погрешностей в частотных характеристиках, т. е. отклонения реальных частотных характеристик цепей от расчетных могут быть использованы рассмотренные формулы для определения погрешностей цепей с реактивными элементами, работающими при синусоидальном возбуждении.

Частотные характеристики служат весьма эффективным средством, обычно используемым для описания поведения цепи с реактивными элементами, работающими на переменном токе.

При этом частотная характеристика выражает передаточную функцию системы

$$\varphi(j\omega) = A(\omega) + jB(\omega),$$

где $A(\omega)$ и $B(\omega)$ — соответственно вещественная и мнимая частотные характеристики.

Входное возбуждение цепи E_{ab} , частотная характеристика цели $\varphi_{ab,cd}$ между точками ab и cd и выходное напряжение U_{cd} связаны соотношением

$$U_{cd} = \varphi_{ab,cd}(j\omega)E_{ab}$$

Если теперь записать погрешность выходного напряжения в цепи

$$\Delta U_{cd} = E_{ab} \left[(\varphi - \varphi_0)_0 + \sum_{n=1}^m \left(\frac{d\varphi}{dq_n} \right)_0 \Delta q_n \right], \quad (74')$$

то член, находящийся в формуле (74') в квадратных скобках, представляет собой отклонение действительной частотной характеристики системы от расчетной. Таким образом, отклонение в частотной характеристике системы

$$\Delta \varphi_{ab,cd}(j\omega) = (\varphi - \varphi_0) + \sum_{n=1}^m \left(\frac{d\varphi}{dq_n} \right)_0 \Delta q_n.$$

Если преобразовать эту формулу $\Delta \varphi_{ab,cd}(j\omega) = \Delta A(\omega) + j\Delta B(\omega)$ то $\Delta A(\omega)$ и $\Delta B(\omega)$ являются отклонениями вещественной и мнимой частотных характеристик системы.

При рассмотрении точности цепей, работающих в переходных режимах, погрешность цепи так же, как и коэффициенты влияния, является переменной величиной, некоторой функцией времени.

51. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ МЕХАНИЗМА

Геометрический метод применяют для исследования точности механизмов. Все соотношения между погрешностью положения ведомого звена и первичными погрешностями звеньев находят на основе геометрических построений. Механизм строится в двух наложенных друг на друга положениях при одном и том же положении ведущего звена, но один раз — при отсутствии первичной погрешности, а второй — при ее наличии. Эти построения механизма выполняются при резко увеличенных значениях первичных погрешностей. При выводе формул, связывающих погрешность положения механизма с первичными отклонениями, вводят ряд упрощений, сущность которых заключается в исключении влияния погрешностей второго порядка малости, т. е. в линеаризации погрешности выходного сигнала. Практически это выражается в независимом рассмотрении каждой первичной неточности и в использовании ряда приближений, из которых наиболее часто используют следующие:

синус малого угла равен углу $\sin \Delta a \approx \Delta a$;

тангенс малого угла равен углу $\operatorname{tg} \Delta a \approx \Delta a$;

косинус малого угла равен единице $\cos \Delta a \approx 1$;

синус, тангенс и косинус суммы значительного угла и малого угла, равны синусу угла $\sin(a \pm \Delta a) \approx \sin \Delta a$, тангенсу угла $\operatorname{tg}(a \pm \Delta a) \approx \operatorname{tga}$ и косинусу угла $\cos(a \pm \Delta a) \approx \cos \Delta a$;

дуга и ее хорда при малом центральном угле равны между собой.

Под употребляемым здесь термином «малый угол» понимается угол, вызванный первичной погрешностью, при значении катета или гипотенузы не менее чем на четыре, а в крайнем случае на три порядка больше, чем порядок погрешности. Например, малым углом при расчете неточности механизма можно считать угол треугольника с отношением сторон в несколько тысячных миллиметра к нескольким десяткам миллиметров. Так, отклонение 0,001 на длине 10 мм даст угол 0,0001 рад, или 21'. При отклонении же 0,01 мм на длине 10 мм угол будет равен 0,001 рад, или 206"=3' 36".

Значительным углом в первом случае можно считать уже

Точность измерительных приборов

угол $1 - 2^\circ$, а во втором случае — 5° . Эти значения выбраны из условия отличия $\sin(\alpha \pm \Delta\alpha)$ от $\sin\alpha$ не более чем на единицу в третьем знаке после запятой (0,001).

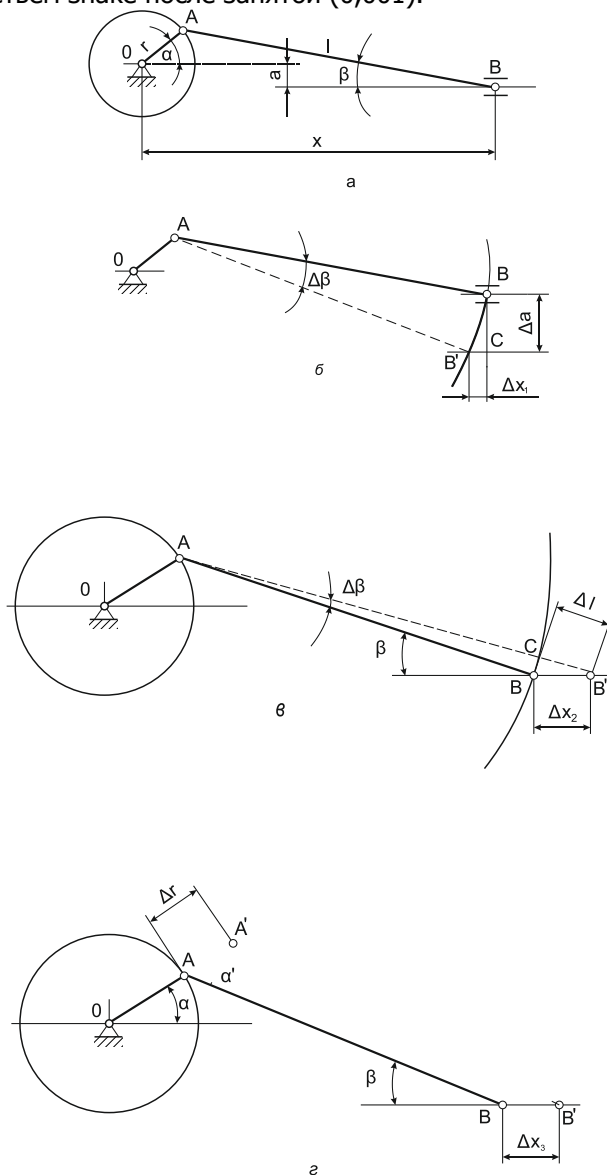


Рис. 94

Пример 51.1. Требуется найти погрешность положения кривошипно - шатунного) механизма, вызванную отклонениями $\Delta\alpha$, Δl и Δr (рис. 94, а).

Начнем с определения влияния погрешности дезаксиала Δa . Строим механизм при двух значениях α , т. е. отличающихся на $\Delta\alpha$ (рис. 94, б); при этом надутое звено OA оставляем в одном и том же положении, а направляющую, по которой движется ползушка B , опускаем на размер Δa . Проведя засечку длиной AB из точки A , находим точку B' . Для нахождения зависимости погрешности положения механизма Δx_1 от первичного отклонения Δa соединим точки B и B' прямой (хордой) и рассмотрим треугольник $BB'C$. В нем угол $B'BC$ будет равен $\beta = \frac{\Delta\beta}{2}$, так как сторона BB' перпендикулярна к биссектрисе угла BAB' . Из угольника $BB'C$ запишем

$$\Delta x_1 = - \Delta a \operatorname{tg}(\beta = \frac{\Delta\beta}{2}).$$

Знак минус взят потому, что положительное значение Δa создает отрицательную величину Δx .

Поскольку обычно угол $\Delta\beta$ мал при соответствующем отношении $\frac{\Delta\alpha}{l \cos\beta}$, то можно записать, что $\Delta x_1 \approx -\Delta a \operatorname{tg}\beta$.

Для определения влияния отклонения длины Δl шатуна ΔB построим механизм OAB при номинальных длинах звеньев и OAB' (рис. 11.40, в) при отклонении Δl . Погрешность положения механизма можно выразить из треугольника $BB'C$, приняв Δl за гипотенузу, а угол $CB'B$ равным $\beta - \Delta\beta$. Тогда погрешность положения механизма, вызванная первичным отклонением длины шатуна,

$$\Delta x_2 = \frac{\Delta l}{\cos(\beta - \Delta\beta)}.$$

Знак плюс в правой части взят потому, что положительное значение Δl создает положительную величину Δx .

Приняв с $\cos(\beta - \Delta\beta)$ к $\cos\beta$, окончательно получим

$$\Delta x_2 = \frac{\Delta l}{\cos\beta}.$$

Влияние погрешности длины кривошипа может быть определено из рис. 94, г, на котором показан механизм с точными звеньями OAB , при отклонении $\Delta r = OA'B'$. Непосредственно на

Точность измерительных приборов

рисунке несколько затруднительно найти связь между Δx_3 и Δr . Если же спроектировать отклонение длины Δr на линию шатуна АВ ($\Delta a' = \Delta r \cos(\alpha + \beta)$, где угол А'Аа' равен $(\alpha + \beta)$), то рассматривая величину Аа' как приращение длины шатуна Δl и учитывая выражение для Δx_2 , можно записать

$$\Delta x_3 = \Delta r \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta}$$

Здесь также принимается знак плюс, учитывая, что положительное Δr увеличивает координату x .

Выражения, полученные для Δx_1 , Δx_2 , Δx_3 , полностью совпадают с соответствующими формулами, найденными методом преобразованного механизма из картины малых перемещений.

Пример 51.2. Рассмотрим влияние некоторых отклонений универсального дисково-рычажного эвольвентомера на погрешность положения механизма.

Кинематическая схема эвольвентомера показана на рис. 95. Эвольвентомер работает Следующим образом. Соосно оси O_1 установлено контролируемое колесо с номинальным радиусом основной окружности r_6 . При перемещении обкаточной каретки 4 на произвольную величину $ф_{гд}$ гибкая лента 6, закрепленная одним концом на сухаре каретки 4 на расстоянии a_1 и другим концом на секторе 8, повернет этот сектор радиусом $r_я$ на угол $ср$. На тот же угол повернется соосно посаженное контролируемое колесо. Обкаточная каретка 4 через роликовый палец 5, удаленный на расстояние a_2 , поворачивает рычаг 3, качающийся вокруг оси O_2 . Линия O_1O_2 должна быть параллельна ходу обкаточной линейки, я расстояния a_1 и a_2 равны между собой. Рычаг 3 через ролик 2 толкает измерительную каретку 7, перемещающуюся параллельно ходу обкаточной каретки. Измерительный наконечник 9, ощупывающий профиль зуба контролируемого колеса, находится на прямой, параллельной ходу обкаточной каретки и проходящей через центр ролика 2.

Для настройки эвольвентомера на радиус r_6 основной окружности контролируемого колеса между измерительной кареткой 7 и базовой поверхностью жесткого упора 1 установлен блок концевых мер размером b ($b = r_6$). При этом перемещение измерительного наконечника 9 равно $ф_{гб}$.

Точность измерительных приборов

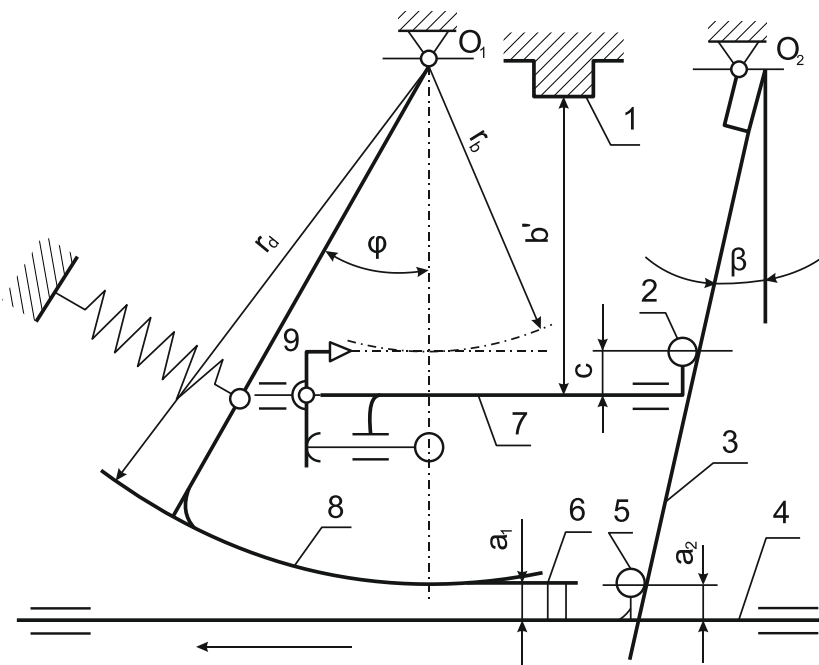


Рис. 95. Кинематическая схема эвольвентомера.

Точность измерительных приборов

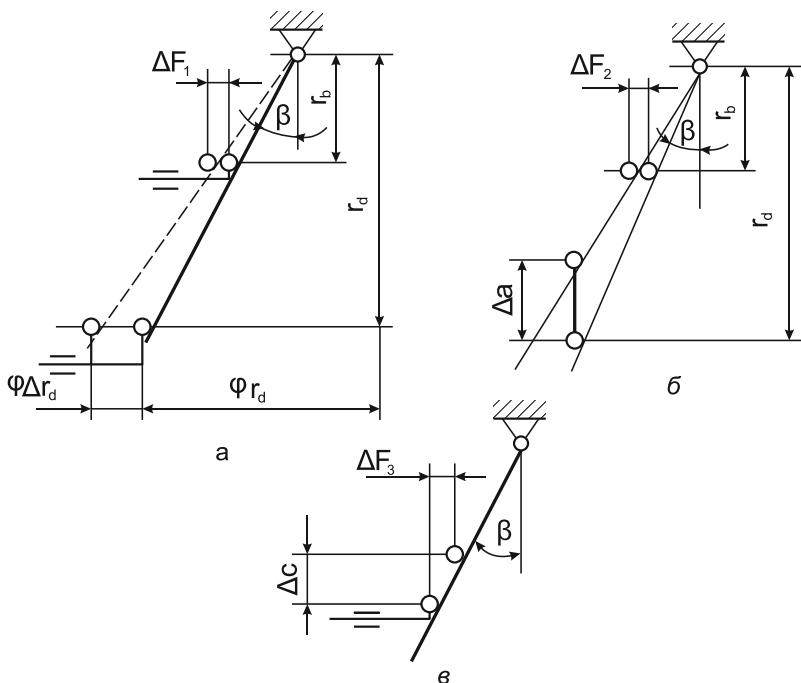


Рис. 96

Рассмотрим влияние первичных отклонений Δr_d , Δa , Δc , Δb на погрешность положения измерительного наконечника ΔF . Δr_d — есть отклонение в радиусе сектора r . При повороте сектора на угол φ палец 5 получит избыточное перемещение $\varphi \Delta r_d$, что вызовет погрешность положения измерительного наконечника

$$\Delta F_1 = \varphi \Delta r_d = \frac{r_b}{r_d}.$$

Здесь в знаменателе принято r_d вместо $(r_d - \Delta r_d)$, что вносит в результат погрешность второго порядка малости.

Отклонение Δa возникает из-за неравенства размеров a_1 — от базы каретки до ленты и a_2 — от базы каретки до центра пальца 5.

$$\Delta a = a_2 - a_1.$$

Согласно рис. 96, б можно написать, что погрешность положения измерительного наконечника из-за Δa

$$\Delta F_2 = \Delta a \frac{\operatorname{tg} \beta}{r_d - \Delta a} r_b,$$

Точность измерительных приборов

где по условиям работы механизма (см. рис. 96, а)

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\varphi r_d}{r_d},$$

т.е

$$\operatorname{tg} \beta = \varphi.$$

Принимая $r_d - \Delta a \approx r_d$ и заменяя $\operatorname{tg} \beta$ на φ , получим

$$\Delta F_2 = \Delta a \varphi \frac{r_b}{r_d}$$

$$\Delta F_3 = -\Delta c \varphi.$$

Отклонение Δc следует понимать как уход центра ролика 2 (см. рис. 95) с линии, параллельной O_1O_2 и проходящей через точку измерительного наконечника 9.

Согласно рис. 96, в

$$\Delta F_3 = -\Delta c \operatorname{tg} \beta$$

или

$$\Delta F_3 = -\Delta c \varphi.$$

Знак минус взят потому, что возрастание c вызывает убывание F .

Отклонение Δb блока концевых мер или расположения базовой поверхности жесткого упора 1 (см. рис. 95) создаст погрешность положения измерительного наконечника, отсчитываемую в направлении теоретической линии перемещения наконечника

$$\Delta F_4 = \Delta b \varphi.$$

Поскольку для эвольвентомера характерна погрешность перемещения, а не положения, то ее можно найти как разность погрешности положения при углах φ_2 и φ_1 . Таким образом, погрешность перемещения механизма

$$\Delta F_{\text{пер}} = (\varphi_2 - \varphi_1) \left(\Delta r_d \frac{r_b}{r_d} + \Delta a \frac{r_b}{r_d} - \Delta c + \Delta b \right).$$

Оценивая в целом геометрический метод определения погрешности механизма, следует отметить, что при нем

1) отпадает надобность в составлении основного уравнения движения механизма;

2) для сложных механизмов трудно найти передаточное отношение между первичной погрешностью и погрешностью положения ведомого звена;

3) при составлении зависимости для погрешности положения механизма имеется опасность, что при отбрасывании величин, оказывающих влияние в виде отклонения второго порядка

Точность измерительных приборов

малости, могут оказаться отброшенными и величины, влияющие в первом порядке малости.

Геометрический метод обычно используют для определения погрешностей положения несложных механизмов.

52. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕХАНИЗМА МЕТОДОМ ПЛАНОВ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Проф. Шишковым В. А. разработан метод, позволяющий решить задачу нахождения влияния всех отклонений звеньев на погрешность положения ведомого звена путем построения единого плана малых перемещений. Единый план строят без применения представления о преобразованном механизме, используя непосредственно схему данного механизма. Этот метод в большей степени унифицирует известные понятия и приемы, применяемые при построении планов скоростей и ускорений, упрощает построение и позволяет в компактной форме учесть влияние всех отклонений сложного механизма.

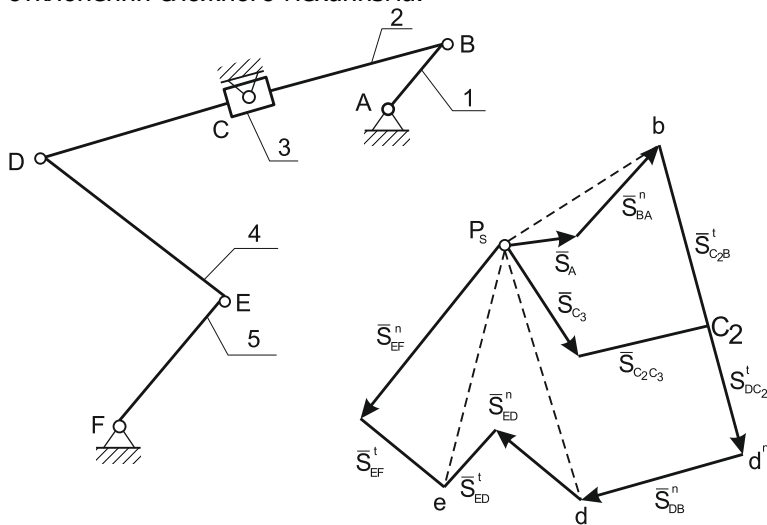


Рис. 97 Схема и соответствующий план малых перемещений шестизвенного механизма.

Построение плана малых перемещений имеет много общего с построением плана скоростей, но при этом есть и различия, а также имеются элементы, сближающие его с планом ускорений. Различие заключается в следующем:

1. Движение любой точки обусловлено не движением ведущего звена, а дефектным перемещением всех других точек из положений, которые они занимали бы в идеальном механизме.
2. Исходные перемещения точек являются величинами, не зависящими друг от друга, и вызваны отклонениями длин звеньев.

Точность измерительных приборов

ев, смещениями центров шарниров и направлений пазов. Эти исходные перемещения при построении планов малых перемещений дополняются перемещениями, обусловленными связями в механизме.

При построении планов допускают, что погрешности в размерах считаются настолько малыми, что направления звеньев реального механизма совпадают с теоретическими. Тем самым учитывают лишь погрешности первого порядка малости, т. е. их рассматривают в пределах линейной теории точности.

На рис. 97 дана схема и соответствующий план малых перемещений шестизвенного механизма. Точка F считается занимающей теоретическое положение. Векторами заданы смещения точек $A(S_A)$ и $C(S_C)$, известны изменения длин \bar{S}_{BA}^n , \bar{S}_{DB}^n , \bar{S}_{ED}^n , \bar{S}_{EF}^n , соответствующих звеньев 7, 2, 4 и 5. На всех планах смещения, заданные или определяемые вычислениями, показаны век-горами со стрелками; если же смещения известны только по направлению, то стрелки не поставлены. Так точки c_2 и e находятся на пересечении прямых данного направления.

Искомым является тангенциальное перемещение точки E относительно точки F, т. е. \bar{S}_{EF}^t . Деля его на длину звена 5 EF, получим погрешность в угле поворота ведомого звена.

Абсолютные перемещения точек B, D и E выражены направленными отрезками p_{sb} , p_{sd} , p_{se} , показанными штрихами. План также позволяет определить относительное перемещение $S_{c,сш}$ в поступательной паре, т. е. перемещение звена DB в направляющей C. В рассмотренном примере расстояние BC_2 считается равным поминальному; из этих предположений найдена точка c_2 на плане. Точка e на плане перемещений находится на пересечении \bar{S}_{EF}^t .

Разработанный проф. Шишковым В. А. метод позволяет строить единый план малых перемещений для нахождения погрешности положения ведомого звена, вызванной отклонениями всех звеньев. При этом нет необходимости прибегать к построению преобразованных механизмов.

53. МЕТОД ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

В некоторых случаях функция преобразования ИУ выражается, произведением нескольких сомножителей и является постоянной величиной, не зависящей от изменения входной величины. Для таких случаев может быть применен метод относительных погрешностей.

Механизмы, состоящие из рычагов или фрикционных передач,, нередко исследуют и рассчитывают, используя понятие об относительной погрешности. Будем различать два вида относительных погрешностей — радиальные и тангенциальные. Относительной радиальной погрешностью называют частное от деления абсолютного отношения радиального размера Δr на номинальное значение размера r . Так, если отклонение размера 25 мм составляет 0,025 мм, то относительная радиальная погрешность равна $0,025/25 = 0,001$.

Для относительной радиальной погрешности характерно то обстоятельство, что в последовательной передаче независимо от принадлежности отклонения к любому звену погрешность имеет постоянный коэффициент влияния, равный ± 1 .

На рис. 98 показана передача, состоящая из трех рычагов, где плечо r_1 связано с ведущей системой.

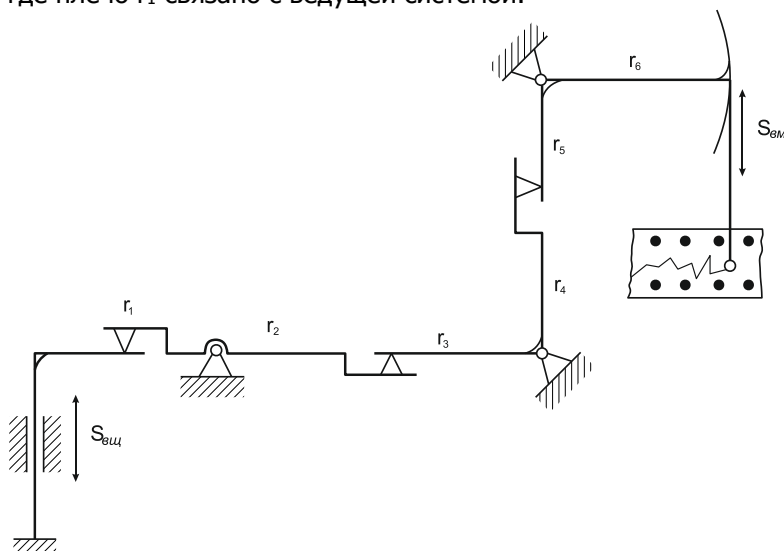


Рис. 98. Передача, состоящая из трех рычагов

Точность измерительных приборов

Выразим погрешность положения механизма через отклонения длин всех шести плеч рычагов. Для этого напишем общее уравнение движения, продифференцируем его в частных производных и заменим дифференциалы малыми приращениями:

$$S_{\text{вм}} = S_{\text{вщ}} \frac{r_2 r_4 r_6}{r_1 r_3 r_5}; \quad (\text{а})$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{\text{вм}} = & \left(\Delta r_2 \frac{r_4 r_6}{r_1 r_3 r_5} + \Delta r_4 \frac{r_2 r_6}{r_1 r_3 r_5} + \Delta r_6 \frac{r_2 r_4}{r_1 r_3 r_5} - \Delta r_1 \frac{r_2 r_4 r_6}{r_1^2 r_3 r_5} - \right. \\ & \left. \Delta r_3 \frac{r_2 r_4 r_6}{r_1 r_3^2 r_5} - \Delta r_5 \frac{r_2 r_4 r_6}{r_1 r_3 r_5^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{б})$$

Умножим и разделим члены, содержащие отклонения длин плеч с четными номерами на размер соответствующего плеча. Тогда после преобразования получим

$$S_{\text{вм}} = S_{\text{вщ}} \frac{r_2 r_4 r_6}{r_1 r_3 r_5} \left(\frac{\Delta r_2}{r_2} + \frac{\Delta r_4}{r_4} + \frac{\Delta r_6}{r_6} - \frac{\Delta r_1}{r_1} - \frac{\Delta r_3}{r_3} - \frac{\Delta r_5}{r_5} \right) \quad (\text{в})$$

или

$$\frac{\Delta S_{\text{вм}}}{S_{\text{вщ}} i_{\text{общ}}^*} = \sum \frac{\Delta r_{\text{п вщ}}}{r_{\text{п вщ}}} - \sum \frac{\Delta r_{\text{п вм}}}{r_{\text{п вм}}} \quad (74)$$

Из полученного выражения видно, что все относительные погрешности звеньев умножаются на одинаковый множитель

$i_{\text{общ}}^* = \frac{r_2 r_4 r_6}{r_1 r_3 r_5}$, являющийся линейным передаточным отношением.

Все эти погрешности имеют постоянный коэффициент влияния, несмотря на различное расположение отклонений вдоль цепи. Заменяя $S_{\text{вщ}} i_{\text{общ}}^* = S_{\text{вм}}$, получим

$$\frac{\Delta S_{\text{вм}}}{S_{\text{вм}}} = \sum \frac{\Delta r_{\text{п вщ}}}{r_{\text{п вщ}}} - \sum \frac{\Delta r_{\text{п вм}}}{r_{\text{п вм}}} \quad (74')$$

т.е. относительная погрешность механизма (погрешность преобразователя на выходе) равняется алгебраической сумме относительных радиальных погрешностей. Поскольку влияние относительной радиальной погрешности любого звена кинематической цепи одинаково, каждое звено следует выполнять с примерно одинаковой относительной радиальной погрешностью.

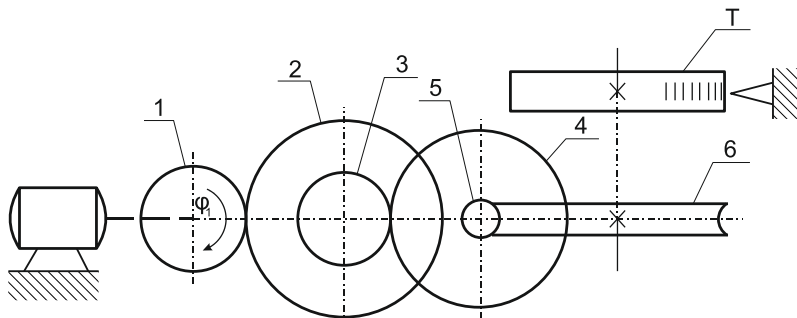


Рис.99. Кинематическая схема цепи

Понятие об относительной радиальной погрешности имеет смысл применительно к рычажным и фрикционным передачам, а также к передачам с гибкой связью, для которых погрешность преобразователя на выходе является линейной функцией входной величины. Относительная радиальная погрешность для зубчатых колес, если она не вызвана изменением числа зубьев колеса, сохраняет свои особенности лишь в пределах малых углов поворота зубчатого колеса, меньших, чем угловой шаг $\tau = \frac{2\pi}{z}$. С возрастанием же угла, на который поворачивается система, отклонение угла Поворота ведомого и ведущего колеса из-за погрешностей колес колеблется вокруг значения, равно отношению числа зубьев. Погрешность на выходе является периодической функцией.

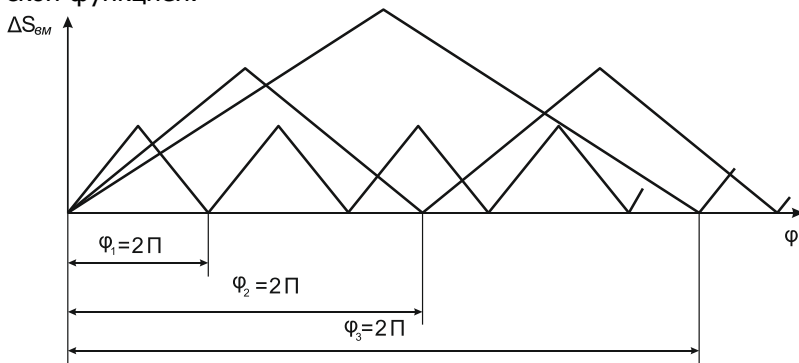


Рис. 100.

На рис. 11.45 показана кинематическая схема цепи 1—6, в которой выходной величиной является угловое положение ведомой системы Т.

Точность измерительных приборов

Из рис. 11.46 видно, что суммарная дуговая погрешность перемещения ведомого звена Т при $\varphi_n > \pi$ (где φ_n — угол поворота любой системы) не имеет прогрессивного характера, т.е. по мере увеличения угла поворота неточного звена проявление его погрешности не возрастает, а является периодической функцией. Точнее говоря, прогрессивное изменение может иметь место лишь при незначительном угле — для погрешности с периодом, равным обороту — до угла π , а для отклонений с высокими частотами — обычно до угла $\tau = \frac{2\pi}{z}$.

Для зубчатых передач понятие об относительной погрешности практически не имеет смысла, так как оно может дезориентировать конструктора при расчете передачи.

Выясним общие положения о влиянии отклонений разных колес кинематической цепи на дуговую погрешность ведомого звена.

Если в выражении для функции изменения тангенциальной погрешности $F'_{in} \ll \sin i_n^{-1} (\varphi + \beta_n)$ принять единый аргумент — угол поворота на выходе φ (угол поворота тихоходного звена), а также заменить отношение радиусов колес соответствующими передаточными отношениями, то функция линейной погрешности кинематической цепи на выходе будет иметь вид

$$\Delta S_{вм} = 0,5 \sum_n [F'_{in} (\varphi + \beta_n) + F'_{i_{n+1}} (\varphi + \beta_{n+1})] i_{n+1} \frac{r_{вм}}{r_{n+1}}, \quad (75)$$

где F'_{in} и $F'_{i_{n+1}}$ — функция изменения кинематической погрешности колес с номерами n и $n+1$; $n=1, 3, 5...$ номера ведущих зубчатых колес; φ — угол поворота на выходе; β_n — фазовый угол; $r_{вм}$ — радиус ведомой системы; r_{n+1} — делительный радиус колеса $n+1$.

Передаточные отношения, указанные в формуле (75), следующие:

$$i_n = \frac{z_n z_{n+2} z_{n+4}}{z_n z_{n+3} z_{n+5}};$$

$$i_{n+1} = \frac{z_{n+2} z_{n+4}}{z_{n+3} z_{n+5}}$$

Из рассмотрения этого выражения для дуговой погрешности ведомой системы видно, во-первых, что множитель при отклонении тихоходной пары (при F'_{i5} и F'_{i6} , если радиусы ведущих колес меньше ведомых и следовательно i_n и $i_{n+1} < 1$) имеет

Точность измерительных приборов

наибольшее значение, равное $r_{вм}/r_6$, т.е. отклонение тихоходной пары оказывает наибольшее влияние; во-вторых, при данном общем передаточном отношении зубчатой цепи целесообразно брать наибольшее снижение скорости для пары, включающей тихоходное звено (наибольшее отношение Z_5/Z_6), что уменьшит влияние всех остальных отклонений, не изменяя проявления не точности тихоходного звена.

Точность зубчатой передачи без учета фазовых сдвигов и периодов действия можно рассчитывать на основании упрощенной формулы, включающей действующие погрешности или допуски и линейное передаточное отношение.

Линейная погрешность на радиусе $r_{вм}$ выходного звена Т

$$\Delta S_{вм} = \pm 0,5 \sum_n (F'_{i_n} + F'_{i_{n+1}}) i_{n+1} \frac{r_{вм}}{r_{n+1}}. \quad (76)$$

Угловая погрешность на выходном звене

$$\Delta S_{вм} = \pm 0,5 \sum_n (F'_{i_n} + F'_{i_{n+1}}) \frac{i_{n+1}}{r_{n+1}} \quad (77)$$

При конструировании зубчатой передачи любой точностной кинематической цепи необходимо придерживаться основных положений:

- тихоходное зубчатое колесо следует выполнять с наивысшей
- точностью;
- редукция в конце цепи у тихоходного звена должна быть наибольшей.

При неизменном передаточном отношении всей цепи сохранение большей скорости вращения в середине кинематической цепи существенно повышает ее общую кинематическую точность, например, $i_{12} = \frac{2}{1} * \frac{1}{2}$ лучше, чем $\frac{1}{1} * \frac{1}{1}$.

При расчете точности кинематических цепей во многих случаях, не ограничиваются расчетом кинематической погрешности на выходном звене, но также учитывают неточности, возникающие при реверсировании системы. Кроме того, расчеты проводят при разных условиях: отсутствии нагружения цепи сопротивлениями или статическими (внутренними), или же действующими при эксплуатации (внешними моментами) и с учетом дополнительных погрешностей, вызванных проявлением нежесткости элементов цепей под действием внутренних или же внешних нагрузок.

В качестве примера на рис. 101 указаны различные рассчи-

Точность измерительных приборов

тываемые и контролируемые показатели, характеризующие погрешность точной отсчетной цепи: при одностороннем и реверсивном режиме работы и при полном отсутствии каких-либо усилий (кинематическая погрешность цепи — КПЦ), при нагружении внутренними силами (измерительная погрешность цепи — ИПЦ) и при наличии воздействия внешних моментов (эксплуатационная погрешность цепи— ЭПЦ).

Мертвый ход МХ в момент реверсирования при отсутствии проявления как статического, так и эксплуатационных моментов («люфт» по рис. 101) можно рассчитывать по формулам 11.32 или 11.33, если вместо значения F_t в них подставлять текущие значения бокового зазора между зубьями $1,06 j_n$ (где $1,06 = \frac{1}{\cos 20^\circ}$). В

любой фазе зацепления мертвый ход

$$j_n = F'_{ioLn} + F'_{ioRn} + j_{no}$$

, где F'_{ioLn} и F'_{ioRn} — кинематическая погрешность передачи по левой и правой линиям зацепления; j_{no} — боковой зазор по линии зацепления в начальной фазе.

Мертвый ход при действии статического ИМХД или эксплуатационного ЭМХД моментов следует находить, исходя также из учета возникающих упругих деформаций кручения и смятия ИПД и ЭПД, а также смещений осей цапф в пределах зазоров в опорах.

Точность измерительных приборов

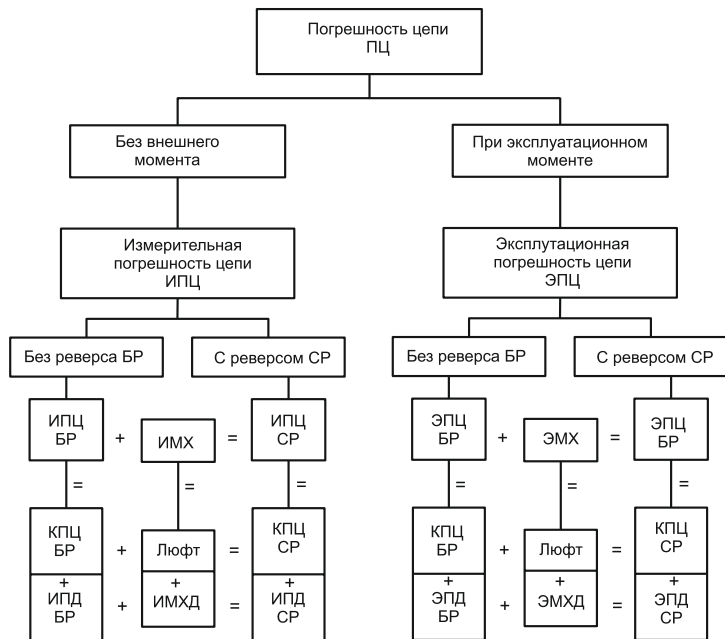


Рис. 101

При расчете следует учитывать двойную деформацию или сумму деформаций при движении в прямом и обратном направлениях .

54. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИУ

Рассмотрев шесть различных методов определения погрешностей ИУ и механизмов и учитывая отмеченные ранее положительные и отрицательные свойства каждого метода, можно в итоге дать общие рекомендации об области применения этих методов в пределах линейной теории точности, когда отбрасываются члены, содержащие первичные погрешности во второй и более высокой степени.

Дифференциальный метод определения погрешностей ИУ рекомендуется для изучения простых приборов, у которых не сложно найти передаточную функцию и нет надобности учитывать погрешности нулевых параметров, не входящих в основное уравнение, таких как взаимоиндуктивности, паразитные емкости или неточности взаимного расположения и формы поверхностей кинематических пар.

Для более сложных ИУ, для которых представляет значительные трудности составление передаточной функции, используют методы, не требующие наличия этого уравнения. В этих случаях коэффициенты влияния определяют одним из следующих методов.

Для плоских механизмов с низшими кинематическими парами, в которых на точность влияют отклонения размеров звеньев, может быть рекомендован метод преобразованного механизма или метод планов малых перемещений. Они позволяют на основе использования известных приемов кинематического анализа механизмов найти графоаналитическим способом уравнения погрешностей положения или перемещения механизма. Эти два метода мало приемлемы для механизмов с высшими парами, для пространственных механизмов и для учета отклонения формы элементов кинематических пар, а также погрешностей взаимного расположения рабочих поверхностей.

Метод преобразованной цепи может быть рекомендован для нахождения коэффициентов влияния как аналитическим, так и экспериментальным путем.

Для рычажных и фрикционных передач можно применять метод относительных погрешностей, дающий значительное упрощение всего вопроса о нахождении неточности ИУ. Этот метод также рекомендуется для ИУ с постоянной характеристикой, вы-

Точность измерительных приборов

ражающейся рядом сомножителей.

Для быстроходных механизмов, когда на точность их работы существенно влияют отклонения формы рабочих элементов кинематических пар, а также погрешности в их взаимном положении, наиболее плодотворным является метод плеча и линии действия. Этот метод легче всего позволяет приводить погрешности технологического процесса к приращениям линии действия. К этой же линии можно приводить и упругие деформации в кинематических парях и звеньях, благодаря чему метод плеча и линии действия находит применение в наиболее сложных случаях изучения точности механизма и, в частности, при исследовании зубчатых передач.

Геометрический метод применим для определения влияния погрешностей в несложных механизмах.

55. ПОГРЕШНОСТИ, ВЫЗВАННЫЕ НЕТОЧНОСТЬЮ НАПРАВЛЯЮЩИХ

Направляющие представляют собой вращательные или поступательные кинематические пары, обычно класса 5, связывающие подвижные звенья механизма с общим для них условно неподвижным звеном — корпусом.

На долю направляющих приходится около половины всех кинематических пар механизма, поэтому рассмотрение способов учета влияния неточностей направляющих на погрешность движения направляемых звеньев является весьма важным.

Действие направляющих может быть основано на взаимном скольжении, качении или упругой деформации деталей направляющих устройств.

По характеру возможных движений направляющие делятся на вращательные и поступательные.

При рассмотрении дополнительных (дефектных) движений, получаемых звеном, несущим элемент, входящий в направляющую кинематическую пару, имеет значение движение рабочих точек звена, через которые проходят линии действия—ведущая и ведомая. По ведущей линии действия рабочее усилие от предыдущего звена передается к рассматриваемому, а по ведомой линии действия исследуемое звено воздействует на последующее звено; при этом расположение звеньев рассматривается в направлении силового потока.

В тех случаях, когда направляемое звено имеет на выходе показывающую стрелку, отражательное зеркало, оптическую призму и т. п., т. е. систему не контактного действия, не воздействующую на направление реакции, в направляющей паре взамен линии действия должна рассматриваться ведомая линия движения рабочей точки.

56. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ЗАЗОРА ВО ВРАЩАТЕЛЬНОЙ ПАРЕ

При идеальном выполнении рабочих поверхностей элементов вращательной пары и равенстве диаметров обоих элементов шейка шарнира и отверстие будут располагаться соосно. При наличии же зазора между этими сопряженными элементами они не будут концентричны, а положение подвижного элемента определится направлением равнодействующей сил, действующих в сочленении. При этом равнодействующая сил соответствует реакции шарнира и проходит через точку касания обоих элементов пары. В процессе вращательного движения звена изменяется направление реакции и следовательно перемещается точка соприкосновения элементов шарнира, т. е. происходит взаимное перекатывание соприкасающихся элементов кинематической пары.

Для каждого мгновенного положения механизма может быть определена действующая погрешность $\Delta F_{\text{вм}}$ вдоль выходной линии действия $ЛД_2$, вызванная смещением оси шарнира в пределах зазора. Эта погрешность

$$\Delta F_{\text{вм}} = j \Delta S_{\text{баз}}, \quad (78)$$

где j — коэффициент влияния смещения центра; $\Delta S_{\text{баз}}$ — действующее смещение идеального центра вращения.

Для определения действующей погрешности можно воспользоваться способом расчета влияния неточностей направляющих на погрешность перемещения направляемых звеньев точных механизмов, разработанным в работе.

Точность измерительных приборов

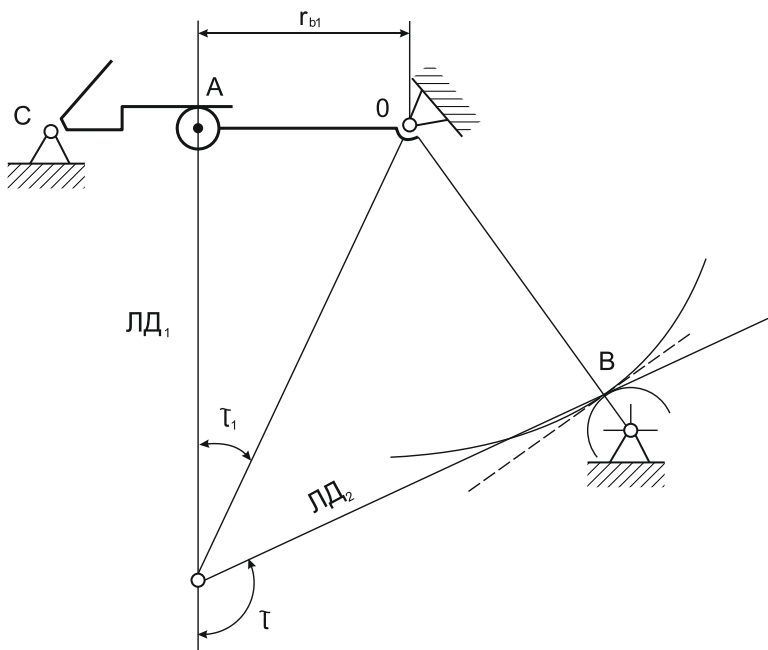


Рис 102.

Сущность метода рассмотрим на механизме, показанном на рис. 102.

Рычаг СЛ воздействует на плечо АО звена, имеющего в точке А сферу, а в точке В зубчатый сектор, зацепляющийся с трибом. Рассмотрим учет влияния зазора в шарнире О на выходную погрешность по линии зацепления в зубчатой передаче сектор — триб.

В рассмотрении влияния смещения в шарнире А участвуют три линии: линия действия ЛД₁ проходящая через рабочую точку на входе звена; линия действия ЛД₂, проходящая через рабочую точку на выходе звена и базовая линия, соединяющая идеальный центр вращения О звена с точкой Р пересечения обеих линий действия.

Действующее смещение идеального центра вращения рассматривается как происходящее по базовой линии. В тех случаях, когда идеальный центр смещается по другому направлению, то в расчет принимается проекция смещения идеального центра вращения на базовую линию $\Delta S_{\text{баз}}$.

Формула для коэффициента влияния / смещения цен-

Точность измерительных приборов

тра может быть выведена рядом способов. В данном случае наиболее наглядным будет вывод с использованием преобразованного механизма. На рис. 103 показан преобразованный механизм, в котором точка А закреплена, ведущее действие $\Delta S_{\text{баз}}$ в точке G происходит по линии PO, а ведомое движение $\Delta F_{\text{вм}}$ точки E происходит по линии действия ЛД₂.

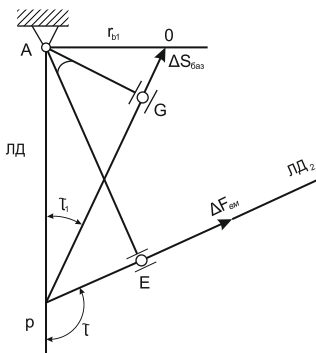


Рис. 103

Коэффициент влияния смещения центра /

$$j = \frac{\Delta F_{\text{вм}}}{\Delta S_{\text{баз}}} = \frac{AE}{AG}.$$

Отрезок AE может быть выражен, как $AE = \frac{r_{b1}}{\text{tg}\tau_1} \sin \tau$, а отрезок, как $AG = r_{b1} \cos \tau_1$, что дает после подстановки окончательную формулу

$$j = \frac{\sin \tau}{\sin \tau_1} \quad (79)$$

где τ — угол между линиями действия, в секторе которого не лежит базовая линия; τ_1 — угол между линией действия 1 и базовой линией.

Смещение идеального центра вращения направляющей следует рассмотреть для трех видов вращательных направляющих: а) на опорах скольжения; б) на опорах качения; в) на упругих опорах.

Для опор скольжения характерным является смещение идеального центра цапфы (рис. 104) из центрального положения относительно отверстия на размер $\Delta S/2$, где ΔS — зазор по направлению действующей реакции.

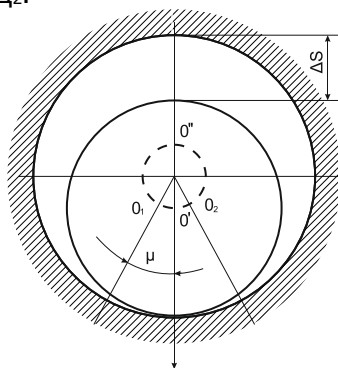


Рис. 104

Точность измерительных приборов

Если при реверсировании работы механизма направление реакции отклоняется из-за сил трения на угол $\pm\alpha$, то вызываемая этим проекция перемещения центра

$$\Delta S_{\text{баз}} = \frac{\Delta S}{2} \frac{\mu^2}{2}.$$

В наихудшем случае, когда не будет иметь место перекатывание («вскатывание») центра цапфы из точки O_1 в точку O_2 , а при реверсировании механизма центр цапфы будет переходить из точки O' в диаметрально противоположную точку O'' , проекция перемещения центра цапфы $\Delta S_{\text{баз}}$ будет равна ΔS .

При вращательной направляющей, выполненной на опорах качения, следует принимать во внимание как размер радиального зазора в подшипнике качения ΔS , так и размер радиального биения E наружного кольца относительно внутреннего. В этом случае размер перемещения центра

$$\Delta S_{\text{баз}} = \Delta S + E.$$

Для вращательных направляющих на упругих опорах следует также учитывать проекцию смещения центра поворота в процессе движения звена. При этом можно воспользоваться исследованиями, в которых получены следующие результаты.

1. Для одиночной плоской пружины:

1.1. при базовой линии, направленной вдоль оси пружины (рис. 11.51,а), проекция смещения идеального центра O при повороте на угол ψ от нейтрального положения

$$\Delta S_{\text{баз}} = \frac{1}{12} z (\psi + 0,02)^2,$$

где z — длина свободного участка пружины.

1.2. при базовой линии, направленной перпендикулярно оси пружины (рис. 11.51, б), проекция смещения на линию OP

$$\Delta S_{\text{баз}} = \frac{1}{120} z \psi^2;$$

2. Для крестообразного упругого шарнира: 2.1. при базовой линии, направленной вдоль оси продольной симметрии $OP \pm$ (рис. 11.52,а), проекция смещения идеального центра на ось продольной симметрии (базовую линию):

$$\Delta S_{\text{баз}} = B_x \phi^2 u,$$

где $B_x = 0,212 (1,75 - k)$. ($k = 0,25$); $k = \frac{2l}{z}$; $u = \frac{0,707}{\cos \frac{\alpha}{2}}$; l -

большее расстояние от центра O до задела.

Точность измерительных приборов

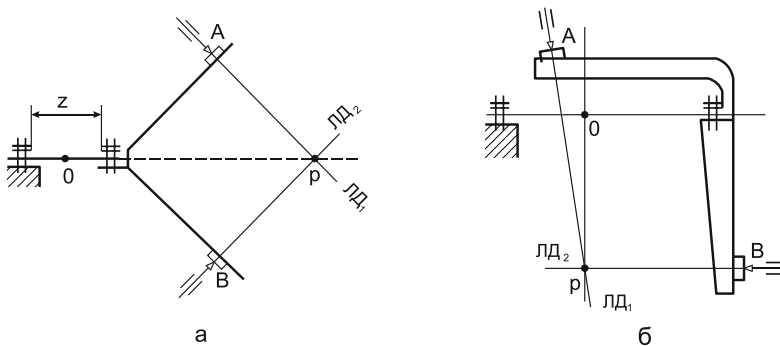


Рис. 105

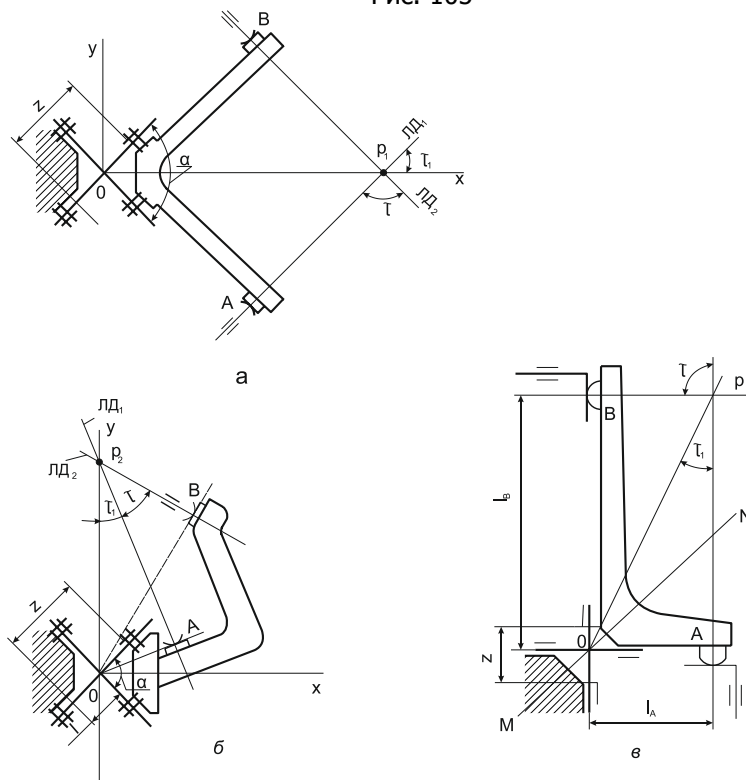


Рис. 106.

При $l = \frac{z}{2}$ и $\alpha = 90^\circ$ $k=l$ и $u=1$, тогда

$$\Delta S_{\text{баз}} = 0,12\psi^2 z$$

Точность измерительных приборов

2.2. при базовой линии, направленной перпендикулярно к оси продольной симметрии, т. е. по линии Oy (рис. 11.52,о), проекция смещения идеального центра на ось поперечной симметрии Oy (базовую линию OP_2)

$$\Delta S_{\text{баз}} = V_y \varphi^2 z u,$$

где $V_y = 0,6 V_x (k - 0,17)$, а k и u по формулам, как для случая 2.1. При $l = \frac{z}{2}$ и $\alpha = 90^\circ$, $k=1$ и $u=1$, откуда

$$\Delta S_{\text{баз}} = 0,06 \varphi^3 z.$$

Рассмотрим пример расчета погрешности, возникающей из-за смещения идеального центра поворота во вращательной направляющей.

Пример 56.1. Определить погрешность, вносимую кинематикой крестового шарнира при повороте рычага на угол $\psi = 0,01$ рад (рис. 106, б). Отношение плеч $i = \frac{l_B}{l_A} = 5$. Свободные промежутки пружин шарнира $z = 4$ мм.

Смещение центра шарнира происходит по линии MN , наклоненной под углом 45° к направлению пружин, и равно

$$\Delta S_{MN} = 0,12 \varphi^2 z.$$

Базовая линия OP составляет с линией MN угол $45^\circ - \tau_1$. Угол

$$\tau_1 = \arctg \frac{l_A}{l_B} \text{ т. е. равен } 12^\circ. \text{ Проекция смещения центра}$$

шарнира на базовую линию

$$\Delta S_{\text{баз}} = \Delta S_{MN} \cos(45 - \tau_1) = 4 \cdot 10^{-5} \text{ мм.}$$

Коэффициент влияния

$$j = \frac{1}{\sin 12^\circ} = 4,8.$$

Действующую погрешность вдоль линии действия LD_2 определяют по формуле (11.34)

$$\Delta F_{\text{вм}} = 4,8 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ мм, т.е. } 0,2 \text{ мкм.}$$

57. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ НАПРАВЛЯЮЩИХ

При рассмотрении поступательного движения направляемого звена механизма возможны два случая:

1. Линии действия рабочих точек направляемого звена пересекаются в точке Р.
2. Линии действия рабочих точек звена параллельны между собой.

Поскольку каждый из этих случаев обладает своеобразием в отношении проявления погрешностей, то рассматривать их надо

отдельно.

1-й случай. Линии действия пересекаются. В случае, когда линии действия, проходящие через рабочие точки направляемого звена пересекаются в точке Р, особенности рассмотрения проявления погрешностей для поступательных направляющих связаны с тем, что центр мгновенного поворота О удален в бесконечность и базовая линия Рр проходит через точку Р перпендикулярно к траектории идеального движения. С учетом этой особенности могут быть использованы для расчета формулы (11.34) и (11.35). Здесь под $\Delta S_{\text{баз}}$ следует понимать погрешность траектории точки Р или любой другой точки, лежащей на нормали Рр.

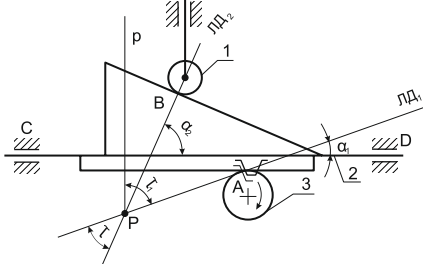


Рис. 106

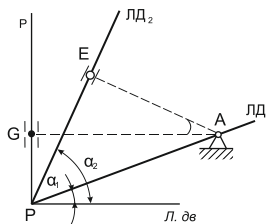


Рис.107

На рис. 107 показан механизм с поступательно движущимся звеном 2. Это звено снабжено зубчатой рейкой, зацепляющейся в точке А с зубчатым колесом 3, приводящим в движение весь механизм. На звене расположена клиновидная линейка, воздействующая в точке В на вертикальный роликовый толкатель 1.

Линии действия ЛД₁ и ЛД₂, проходящие через рабочие точки А и В, пересекаются в точке Р. Базовая линия Рр проведена через точку Р перпендикулярно к траектории направляемого зве-

на 2.

Отметим, что при контроле непрямолинейности хода направляемого звена 2 механизма погрешность $\Delta S_{\text{баз}}$ следует измерять по базовой линии Pp . Например, при контроле непрямолинейности хода с помощью образцовой линейки, закрепляемой на звене 2 параллельно его ходу, точка контакта отсчетного устройства должна лежать на линии Pp , с которой совмещается и линия измерения.

В некоторых случаях при расчете погрешностей поступательных направляющих удобнее пользоваться углами, отсчитываемыми между линией движения и линиями действия (α_1 и α_2 на рис. 108) взамен углов τ и τ_1 . В этом случае формула для коэффициента влияния может быть найдена из следующего выражения:

$$j = \frac{\sin \tau}{\sin \tau_1}; \text{ где } \tau = \alpha_2 - \alpha_1 \text{ и } \tau_1 = 90 - \alpha_1,$$

откуда

$$j = \frac{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)}{\cos \alpha_1},$$

что дает после преобразования

$$j = |\operatorname{tg} \alpha_1 \cos \alpha_2 \pm \sin \alpha_2| \quad (80)$$

В формуле (80) знак + при одностороннем наклоне обеих линий действий относительно линии движения Л.дв.

Формула для коэффициента влияния погрешности поступательных направляющих является общей для любого плоского механизма.

Формула для j может быть также найдена из преобразованного механизма (рис. 108).

Закрепив точку A и опустив перпендикуляры из нее на линии LD_2 и Pp , получим точки E и G расположения шарниров и ползушек механизма EAG . Из его рассмотрения найдем

$$j = \frac{\overline{AE}}{\overline{AG}} = \frac{\overline{AP} \sin(\alpha_2 - \alpha_1)}{\overline{AP} \sin(90 - \alpha_1)} = \frac{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)}{\cos \alpha_1},$$

что дает после преобразования найденную ранее формулу (80).

Рассмотрим несколько примеров определения действующей погрешности вдоль линии LD_2 .

Пример 59.1. Для кривошипно-шатунного механизма (см. рис. 104, а) определить действующую погрешность вдоль направляющей, создаваемую ее непрямолинейностью Δp .

Точность измерительных приборов

Коэффициент влияния находят по формуле (80) из условия $\alpha = \beta$; $\alpha_2 = 0$, откуда $j = \operatorname{tg} \beta$ и действующая погрешность по выражению (78) вдоль линии действия ЛД₂.

Пример 59.2. Для каретки с клиновой линейкой, наклоненной на угол φ к линии движения (рис. 109), определить действующую погрешность по линии действия ЛД_г, создаваемую погрешностями Δ_c и Δ_d в контактных точках С и D.

Линия действия ЛД₁ проходит через точку А и совпадает с линией движения, поэтому $\alpha_1 = 0$. Линия действия ЛД₂ проходит через точку В под углом $\alpha_2 = 90 - \varphi$ к линии движения. Коэффициент влияния равен

$$j = \sin(90 - \varphi) = \cos \varphi.$$

Величина смещения вдоль базовой линии Рр

$$\Delta_p = (\Delta_D - \Delta_C) \frac{\overline{AP}}{x} + \Delta_C.$$

Подставляя эти значения в формулу (II.34), можно рассчитать избыточное перемещение вдоль линии действия ЛД₂.

Пример 59.3. Найти погрешность, вызванную перекосом цилиндрического стержня в направляющих С и D при зазоре S_c и S_D (рис. 110).

Стержень в точке А контактирует с измеряемым объектом, и его осевое перемещение посредством зубчатой рейки приводит во вращение триб. Полюс зацепления триб — рейка в точке В.

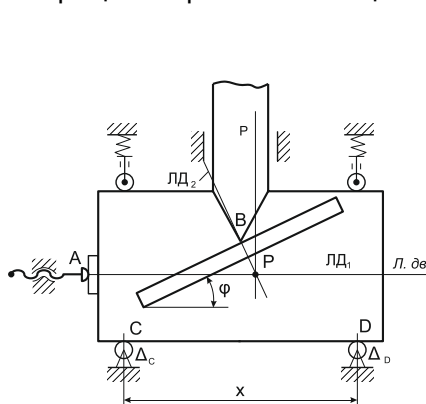


Рис.109

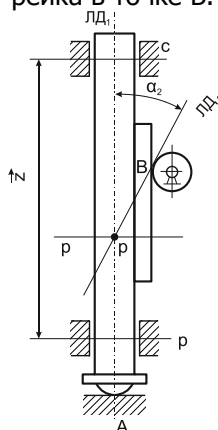


Рис. 110

Линия действия ЛД₁ ведущей рабочей точки А совпадает с осью стержня, т. е. с линией движения, откуда $\alpha_1 = 0$. Линия действия ведомой рабочей точки В составляет с линией движения

Точность измерительных приборов

угол α_2 . Эти линии движения пересекаются в точке Р. Базовая линия Рр перпендикулярна к оси стержня. Коэффициент влияния равен:

$$j = \sin \alpha_2.$$

Перемещение вдоль базовой линии, вызванное перекосом в пределах зазора s направляющих

$$\Delta_p = 0,5(s_c + s_D) \frac{AP}{l}.$$

По формуле (78) может быть найдено избыточное перемещение вдоль линии действия ЛД₂.

2-й случай. Линии действия параллельны. Если линии действия рабочих точек параллельны, то тогда формула (80) для определения коэффициента влияния не годна, поскольку $\alpha_1 = \alpha_2$ и $j=0$. Кроме того, не может быть применено и понятие о базовой линии, так как не только центр поворота удаляется в бесконечность, как это было в случае прямолинейного поступательного перемещения, но и отсутствует точка пересечений двух линий действия.

На рис. 101 показана направляющая для измерительного стержня и рабочей контактной плоскости рычажно-зубчатого индикатора. Рабочая точка А соответствует точке контакта измерительного наконечника с измеряемым изделием, а точка В является точкой соприкосновения плоскости со сферой, закрепленной на качающемся звене рычажного механизма отсчетного прибора.

На рис. 102 показана направляющая в виде штанги и рамки штангенциркуля. Через рабочую точку А проходит линия действия, а в точке В расположен отсчетный индекс для снятия отсчета по линейной шкале, с которой совпадает линия движения Л.дв₂.

Возникающая погрешность на выходе вследствие погрешности направляющей пары связана с возникновением перекоса направляемого звена на угол δ и расстоянием l между линиями действия.

Точность измерительных приборов

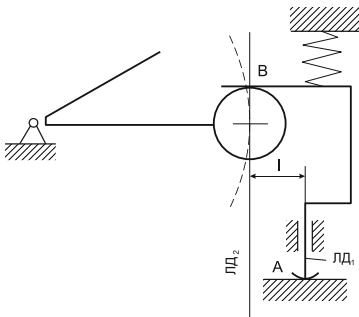


Рис. 101

Действующая погрешность по выходной линии действия ЛДг

$$\Delta F_{\text{вм}} = l\beta \quad (81)$$

Во многих случаях угол δ можно находить по разности Δ_1 и Δ_2 погрешностей, траекторий двух точек, не лежащих на одной нормали к траектории, а удаленных между собой на расстояние x . Тогда

$$\delta = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{x}$$

В случае, когда $l=0$, т. е. линии действия совпадают, имеет место выполнение принципа Аббе, и влияние перекоса направляемого звена становится погрешностью второго порядка малости.

Рассмотренные выше методы расчета погрешностей, создаваемых неточностями выполнения элементов вращательных и поступательных пар на выходную погрешность направляемого звена, позволяют при проектировании и изготовлении прибора уменьшать эту действующую погрешность не только за счет повышения требований к изготовлению и сборке входящих в пару элементов. Действующую погрешность возможно уменьшить за счет снижения коэффициента влияния j , т. е. рационального конструирования механизма. Особенно следует учитывать действие сил трения и изменение их направления при реверсировании механизма.

В одной из наших работ показано, что при учете трения на плечах тангенсных и синусных рычагов возникает значительная погрешность по выходной линии действия при реверсировании работы механизма. Реверсирование меньше сказывается при передаточных отношениях плеч рычага, близких к единице; двустороннем расположении плеч рычага относительно направления реакции шарнира; уменьшении трения на плечах рычага, а также

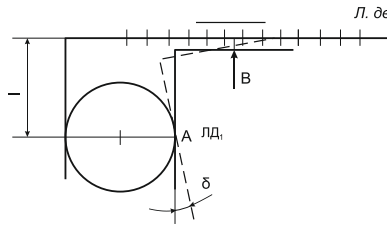


Рис. 102

Точность измерительных приборов

при работе вокруг начального положения рычага (совпадающего с теоретическими плечами в начальном положении), а также при малых углах поворота, близких к начальному положению.

Для звена механизма, состоящего из триба и стрелки, перемещающейся над секторной (не полной круговой) шкалой, и сохранения рабочих профилей погрешность при реверсировании будет сказываться минимально, если ось симметрии шкалы будет совпадать с направлением радиуса, параллельным линии зацепления.

Для пары соосно расположенных зубчатых колес погрешность при реверсировании передачи и работе теми же профилями зависит от центрального угла между полюсами зацепления этих соосных зубчатых колес с ведущим и ведомым колесами зубчатой передачи. При определенном взаимном расположении полюсов зацепления можно добиться того, что на погрешность перемещения зубчатого механизма не будет при реверсировании влиять зазор в шарнире.

Повышение точности работы поступательных направляющих достигается в некоторых случаях путем разделения транспортных и измерительных функций, выполняемых этими направляющими. Обычно в этих случаях в качестве измерительных направляющих используют образцовые поверхности, разгруженные от усилий, связанных с сопротивлениями перемещений кареток, а также контактный оптический волнограф ИС-33 с образцовой направляющей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Коротков В.П., Тайц Б.А. Основы метрологии и теории точности измерительных устройств. М., Издательство стандартов, 1978, 349 с.
2. Иванцов А. И. Основы теории точности измерительных устройств. М., Изд-во стандартов, 1972, 212 с.
3. Кемпинский М. М. Точность и надежность измерительных приборов. Расчет и экспериментальная оценка. Л., «Машиностроение», 1972, 264 с.
4. Коченов М. И., Правоторов Е. А., Сергеев В. И. Вероятностное моделирование в задачах точности. М., «Наука», 1973, 152 с.
5. Срибнер Л. А. Точность индуктивных преобразователей перемещений. М., «Машиностроение», 1975, 106 с.
6. Тайц Б. А. Точность и контроль зубчатых колес. М., «Машиностроение», 1972, 368 с.
7. Цидулко Ф. В. Выбор параметров пневматических приборов размерного контроля. М., «Машиностроение», 1973, 144 с.
8. Якушев А. И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. М., «Машиностроение», 1974, с. 471.
9. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. — Л.: Энергоатомиздат, 1991.
10. Латыев С.М. Конструирование точных (оптических) приборов. Учебное пособие. СПб, Политехника, 2007.
11. Оптико-электронные приборы для научных исследований: Учеб. пособие / Л.А. Новицкий, А.С. Гоменюк, В.Е. Зубарев, А.М. Хорохоров. – М.Машиностроение, 1986. – 432с., ил.
12. Федеральный закон Российской Федерации от 26 июня 2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».
13. Федеральный закон Российской Федерации от 10 июня 1993 года № 5154-1 «О стандартизации».
14. Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании».
15. РМГ 29-99 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.
16. ГОСТ 8.009-84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
17. ГОСТ Р 1.0-92 Государственная система стан-

Точность измерительных приборов

дартизации Российской Федерации. Основные положения. – М.: Изд-во стандартов, 1992.

18. ГОСТ Р 8.417-2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин.

19. ГОСТ 8.395. ГСИ. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования. - М.: Изд-во стандартов.

20. ГОСТ 8.513. ГСИ. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения. - М.: Изд-во стандартов.

21. ГОСТ 8.401. ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования.

22. ГОСТ 8.117-81. ГСИ. Единицы физических величин.

23. МИ 2277-94 ГСИ. Система сертификации средств измерений. Основные положения и порядок проведения работ.

24. ПР 50.2.006-94 ГСИ. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения.

25. ПР 50.2.009-94 ГСИ. Порядок проведения испытаний и утверждения типа средств измерения.