



Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Конструирование и производство приборов»

## ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Часть 1 Основы теории точности

Учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-38 01 01  
«Механические и электромеханические приборы и аппараты»

*Электронный учебный материал*

Минск ◊ БНТУ ◊ 2014

УДК 681.2 (07)

**Автор:**  
Суровой С.Н.

**Рецензент:**  
Соколовский С.С., к.т.н., доцент кафедры БНТУ

Учебное пособие содержит три основных раздела, соответствующих структуре теории точности, в которых рассмотрен комплекс вопросов, связанных с решением прямой и обратной задач теории точности, а также с особенностями выполнения мероприятий, направленных на повышение точности измерительных устройств. Учебное пособие может быть использовано для самостоятельной работы студентами как заочного, так и дневного отделения специальности, изучающих дисциплину «Теория и расчет измерительных приборов и систем».

Белорусский национальный технический университет  
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.(017) 232-77-52 факс (017) 232-91-37  
E-mail: emd@bntu.by  
Регистрационный № БНТУ/ПСФ80-50.2014

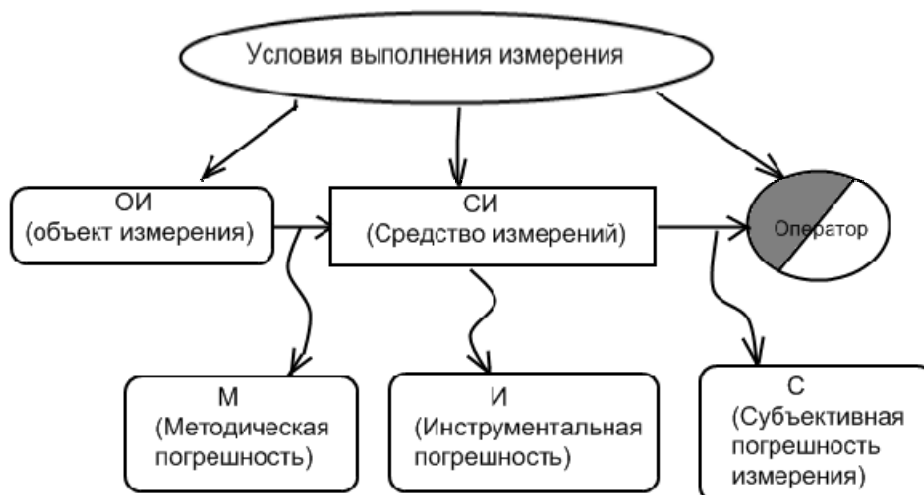
©БНТУ, 2014  
© Суровой С.Н., 2014

## Содержание

1. Предмет и задачи курса.....	4
2. Основные структурные элементы измерительных устройств.....	5
3. Определение точности измерительных устройств. Показатели точности.....	6
4. Причины возникновения погрешностей измерительных устройств.....	7
5. Принципы установления первичных погрешностей измерительных устройств.....	8
6. Определение результатов действия первичных погрешностей на показания измерительных устройств (кинематический точностной анализ).....	8
7. Погрешность схемы измерительного устройства (структурная, теоретическая).....	10
7.1 Аналитический метод определения погрешности схемы измерительных устройств.....	10
8. Регулирование измерительных устройств.....	10
9. Структура теории точности.....	11
10. Точностной синтез.....	11
10.1 Структурный точностной синтез.....	11
10.2 Размерный точностной синтез.....	12
10.2.1 Метод интерполирования.....	12
10.2.2 Метод квадратичного приближения.....	13
10.2.3 Метод наилучшего равномерного приближения.....	13
11. Выявление первичных погрешностей.....	14
11.1 Методика академика Н.Г. Бруевича.....	14
11.2 Методика профессора Н.А. Калашникова.....	15
12. Методы отыскания коэффициентов влияния и конечных погрешностей.....	16
12.1 Метод дифференциальный.....	16
12.2 Метод преобразованной цепи (механизма).....	17
12.3. Определение погрешности механизмов методом планов малых перемещений.....	17
12.4 Метод фиктивной нагрузки.....	19
12.5 Геометрический метод.....	19
12.6 Метод относительных погрешностей.....	20
12.7 Метод плеча и линии действия.....	21
13. Влияние векторных первичных погрешностей на показания измерительного устройства.....	22

14. Погрешности механизма, вызванные неточностью направляющих.....	23
14.1. Учет влияния зазора во вращательной паре.....	23
14.2. Учет влияния погрешностей прямолинейных направляющих.....	26
15. Сетка влияния конечных погрешностей.....	29
15.1 Анализ сетки влияния первичных погрешностей.....	29
16. Технологическо - эксплуатационный точностной анализ механизмов.....	30
16.1 Технологические составляющие первичных погрешностей механизма.....	30
16.2 Оценка законов распределения технологических первичных погрешностей.....	31
16.3. Относительные числовые характеристики распределения первичных погрешностей.....	31
16.4 Законы распределения технологических погрешностей.....	32
16.4.1 Закон Максвелла, закон эксцентриситета.....	33
16.4.2 Закон равномерной плотности или закон равной вероятности.....	33
16.4.3. Закон арккосинуса .....	33
17. Эксплуатационные составляющие первичных погрешностей механизма.....	34
17.1. Влияние износа на точность работы механизма.....	34
17.2. Деформации деталей.....	35
18. Расчет точности партии однородных измерительных устройств.....	36
18.1 Способы уменьшения ожидаемой погрешности.....	40
18.2 Последовательность расчета точности партии однородных измерительных устройств.....	40
19.Компенсация погрешностей механизма.....	41
19.1. Виды конечных погрешностей механизма.....	41
19.2. Классификация погрешностей по закономерности их изменения и по способам регулировки.....	42
19.2.1 Погрешности постоянные (аддитивные).....	43
19.2.2 Прогрессивные (мультипликативные). .....	43
19.2.3 Нелинейные.....	43
19.2.4 Погрешности периодические.....	44
19.2.5 Аперiodические .....	44
Литература.....	46

## 1. Предмет и задачи курса



Суммарная погрешность измерения может быть представлена в следующем виде:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_M^2 + \delta_I^2 + \delta_C^2 + \delta_Y^2}$$

где  $\delta_M$  - методическая составляющая,

$\delta_I$  - инструментальная составляющая,

$\delta_C$  - субъективная составляющая,

$\delta_Y$  - погрешность, связанная с отклонением условий измерения от нормальных.

$$\delta_{\Sigma} = (1/3 \dots 1/5)IT$$

Погрешность измерения составляет от 1/3 до 1/5 части от допуска на контролируемый параметр.

Предмет теории точности – одна из составляющих суммарной погрешности измерения, а именно инструментальная погрешность. Многообразие направлений рассмотрения

точности измерительных устройств, в значительной мере определяющих погрешность измерения, можно отнести к трем стадиям:

1. Проектирование
2. Производство
3. Эксплуатация

На первой стадии осуществляется обеспечение точности, при которой решаются прямая и обратная задачи теории точности.

Задачи теории точности:

1). Прямая (задача синтеза) – выбор структуры устройства, определение номинального значения параметров таким образом, чтобы ожидаемая погрешность не вышла за ранее установленные пределы.

$$\Delta S = f(q_i, \Delta q_i) < [\Delta S]$$

$$\Delta S = f(\Delta q_i) < [\Delta S]$$

$\Delta S$ - погрешность схемы (теоретическая)

Прямая задача обычно математически выражается одним уравнением точности, содержащим большое число неизвестных, и решается либо методом последовательных приближений, либо путем наложения дополнительных условий. С использованием вычислительной техники задача решается методом статистических испытаний, методом Монте-Карло либо методом математического моделирования.

2). Обратная (анализа) – при известной структуре измерительного устройства, известных номинальных значениях параметров и допусков на них, необходимо определить ожидаемую погрешность измерительного прибора

а).  $\Delta S \gg [\Delta S]$

б).  $\Delta S > [\Delta S]$

в).  $\Delta S = [\Delta S]$

г).  $\Delta S < [\Delta S]$

д).  $\Delta S \ll [\Delta S]$

Эту задачу решают значительно проще, т.к. она сводится к суммированию влияния отдельных составляющих погрешностей и к определению общей выходной неточности, проявляющейся при использовании рассчитываемого измерительного устройства.

Исходя из подобного расчета могут быть сформулированы требования к точности измерительного устройства в целом, на основе которых выполняют контрольно-приемочные испытания. В результате расчета могут быть решены вопросы о целесообразности применения метода взаимозаменяемости, о необходимости введения компенсаторов и о выборе регулируемых звеньев.

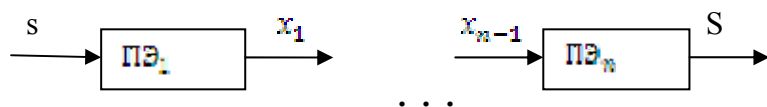
## 2. Основные структурные элементы измерительных устройств

Преобразовательный элемент – элемент, обеспечивающий преобразование сигналов измерительной информации. Совокупность преобразовательных элементов, осуществляющих все необходимые преобразования измерительной информации, называется измерительной цепью средства измерения. Часть первого в измерительной цепи преобразовательного элемента, непосредственно воспринимающего сигнал измерительной информации, называется чувствительным элементом.

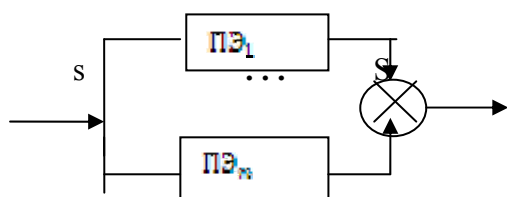
Преобразовательные элементы могут составлять различные цепи измерительных устройств:

### 1). Разомкнутые

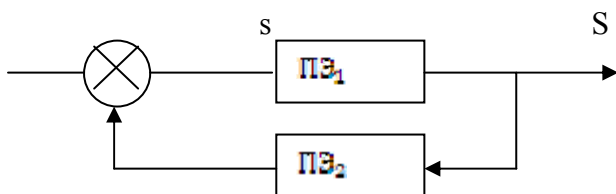
#### 1.1 с последовательным соединением преобразовательных элементов



#### 1.2 с параллельным соединением преобразовательных элементов



### 2). Замкнутые, со встречно параллельным соединением преобразовательных элементов



## 3. Определение точности измерительных устройств. Показатели точности

В ряду показателей качества изделий (точность, надежность, долговечность, экономичность) для измерительных устройств показатели точности занимают первое место. В соответствии с нормативно-технической документацией предел допускаемой абсолютной погрешности может выражаться одним числом:

$$\Delta = \pm a$$

$\Delta$ - условное обозначение обеих границ допускаемой абсолютной погрешности

a – числовое значение предела, в единицах измеряемой величины

Предел допускаемой абсолютной погрешности может быть дан в зависимости от измеряемой величины

$$\Delta = (a \mp bx)$$

Предел допускаемой приведенной погрешности показаний измерительного устройства  $\gamma$  выражается в процентах по отношению к нормируемому значению  $x_N$ :

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N} \cdot 100 \%$$

$x_N$  - может быть равно одному из указанных ниже значений:

- 1). Конечному значению рабочей части шкалы (для средств измерений с равномерной и степенной шкалой, когда нулевая отметка находится в начале шкалы).
- 2). Сумме конечных значений рабочей части шкалы (когда нулевая отметка в середине шкалы).
- 3). Равно номинальному значению  $x$  (если оно установлено).
- 4). Равно длине шкалы (при логарифмической или гиперболической шкалах).

#### 4. Причины возникновения погрешностей измерительных устройств

При проектировании и изготовлении реально-создаваемые устройства существенно отличаются от тех прототипов, которые наилучшим образом решают поставленную задачу измерения. Эти отклонения могут вызываться применением упрощенной схемы приборов, погрешностями монтажа, влиянием действующих сил, вызывающих деформацию деталей, сопротивлением из-за трения, износом.

Исходя из этого, различают следующие 5 групп погрешностей приборов:

- 1). Погрешности схемы приборов - объединяют погрешности, вызванные применением схемы измерительного устройства, которое лишь приближенно осуществляет заданный закон преобразования.
- 2). Технологические погрешности – вызваны неточностью при изготовлении или монтаже элементов измерительных устройств.

Обычно все технологические погрешности механической части приборов делят на 4 группы:

- а). погрешности размеров;
- б). погрешности формы (нецилиндричность, отклонение от круглости и т.д.);
- в). погрешности расположения (биение, несоосность, неперпендикулярность и т.д.);
- г). шероховатость, волнистость;

Технологические погрешности для электрических цепей относят к 2 группам:

- а). погрешности изготовления;
- б). погрешности монтажа;



3). Динамические погрешности, возникновение которых вызвано проявлением инерционных сил, действующих в приборе. К ним относят деформации, связанные с жесткостью деталей приборов (в том числе контактные и упругие), а также проявление сил трения, воздействие таких динамических явлений как вибрации, неуравновешенности, ударно-колебательные процессы.

4). Температурные погрешности, вызванные изменением температурных условий работы прибора, вследствие которых изменяются реально действующие физические параметры и коэффициенты влияния, и из-за чего возникает дополнительная погрешность.

5). Погрешности, изменяющиеся во времени - связаны с изменением параметров прибора с течением времени (снижение упругости, износ деталей, а следовательно и изменение размеров).

Многие из них объединяются в группу износ, а другие в группу старение.

Проектируемое измерительное устройство должно обладать запасом точности, обеспечивать работоспособность прибора после заданного срока эксплуатации. Предусматриваемый запас точности 40-50% от предельной погрешности. В некоторых случаях предусматриваются 2 нормы точности:

- на приемку нового прибора
- на допускаемую погрешность к концу срока эксплуатации.

## **5. Принципы установления первичных погрешностей измерительных устройств**

Условимся считать первичной погрешностью ту, которая имеется в данном элементе измерительных устройств. Последовательное деление измерительного устройства на элементы может быть выполнено следующим образом:

- 1). Узлы и блоки
- 2). Кинематические пары
- 3). Детали
- 4). Рабочие поверхности деталей

Если рассмотреть измерительное устройство в целом, то первичными погрешностями являются погрешности на всех ступенях деления. Определим 3 принципа, которые должны удовлетворять первичной погрешности:

1. Принцип координирования, т.е. отсчет всех первичных погрешностей измерительного устройства необходимо выполнять в единой системе координат
2. Принцип независимости действия первичных погрешностей необходим, чтобы влияние одной погрешности можно было бы определить, полагая, что все прочие первичные погрешности равны нулю
3. Принцип однозначности, т.е. каждый параметр, погрешность которого определяют, должен быть представлен таким существенно постоянным знаком, чтобы его теоретическое значение было единственным.

## 6. Определение результатов действия первичных погрешностей на показания измерительного устройства (кинематический-точностной анализ)

Принимаем во внимание лишь те первичные погрешности, которые влияют на выходную величину измерительного устройства.

Предполагается, что математическое описание (градуировочная характеристика) имеется. Ранее было выведено, что точно показание измерительного устройства равно:

$$\varphi_0 = f_0(x, q_s)$$

а действительное показание измерительного устройства равно:

$$\varphi = f(x, q_s + \Delta q_s)$$

погрешность показаний измерительного устройства равна:

$$\varphi = f(x, q_s + \Delta q_s) - f_0(x, q_s)$$

Полученная функция, в общем случае нелинейна, может быть сложной и лишь в частном случае линейной.

Для широкого практического применения применимо приближенное значение, в котором эта функция приводится к линейной. Разложим в ряд Тейлора первый член правой части полученного выражения:

$$f(x, q_s + \Delta q_s) = f(x, q_s) + \left(\frac{\partial f}{\partial q_{s0}}\right)_0 * \Delta q_s + \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial q_s^2}\right) * \Delta q_s^2 + \dots$$

Индекс "0" означает, что частную производную берут в точке  $q_s$ , то есть без учёта первичных погрешностей.

Ограничиваясь двумя первыми членами разложения и подставляя их в предыдущее равенство, получим:

$$\Delta\varphi = f(x, q_s) + \left(\frac{\partial f}{\partial q_{s0}}\right)_0 * \Delta q_s - f_0(x, q_s)$$

Разница между первым и третьим членами и есть погрешность схемы, второй член определяет погрешность показаний измерительного устройства, вызванного его первичными погрешностями.

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{сх}} + \Delta\varphi_{q_s}$$

$$\Delta\varphi_{q_s} = \left(\frac{\partial f}{\partial q_s}\right)_0 * \Delta q_s$$

Это выражение представляет собой линейную функцию и теория основанная на её применении носит название линейной теории точности.

$\Delta\varphi_{q_s\Sigma}$  - результат совместного действия всех первичных погрешностей измерительного устройства.

$$\Delta \varphi_{q_s \Sigma} = \sum_{s=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial q_s} \right)_0 * \Delta q_s$$

Считаем, что все  $q_s$ (первичные погрешности) взаимонезависимы, так как был провозглашён принцип независимости действия.

## 7. Погрешность схемы измерительного устройства(структурная, теоретическая)

Погрешность схемы измерительного устройства - это погрешность, которая не зависит от точности изготовления отдельных элементов, не зависит от оператора, а определяется только структурой измерительного устройства и номинальным значением параметров.

Теоретическая погрешность – закладывается конструктором в начале проектирования. Это единственная погрешность, которая возникает при проектировании. Она заранее известна и поддаётся воздействию. Погрешность измерительного устройства, вызванная отступлением реальной схемы от схемы точно осуществляющей заданный закон преобразования, может быть определена аналитическим путём. Лишь в некоторых случаях, когда процессы происходящие в измерительном устройстве недостаточно изучены, может применяться экспериментальный метод определения погрешности схемы измерительного устройства.

### 7.1 Аналитический метод определения погрешности схемы измерительного устройства

Этот метод заключается в сопоставлении непрерывной функции изменения выходного сигнала схематизированного измерительного устройства с подобной ей функцией теоретического измерительного устройства.

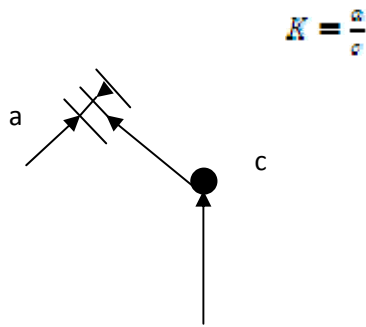
$$\Delta S_{сх} = S_{сх} - S_0 \quad (*)$$

Найденная по формуле (\*) погрешность схемы для измерительного показывающего прибора характеризует избыточное или недостаточное перемещение отсчётного указателя(стрелки прибора).

Так как для показывающего измерительного прибора представляет интерес погрешность показаний прибора, выраженное в измеряемых величинах, то для её определения необходимо найденное значение или функцию погрешности на выходе разделить на чувствительность прибора  $K$ , и тогда погрешность схемы измерительного устройства на входе выраженная в измеряемых величинах:

$$\Delta S_{сх}^{изм} = \frac{\Delta S_{сх}}{K}$$

$K$  - чувствительность прибора, которая по ГОСТ определяется как отношение изменения сигнала на выходе измерительного устройства, к вызывающему его изменению измеряемой величины.



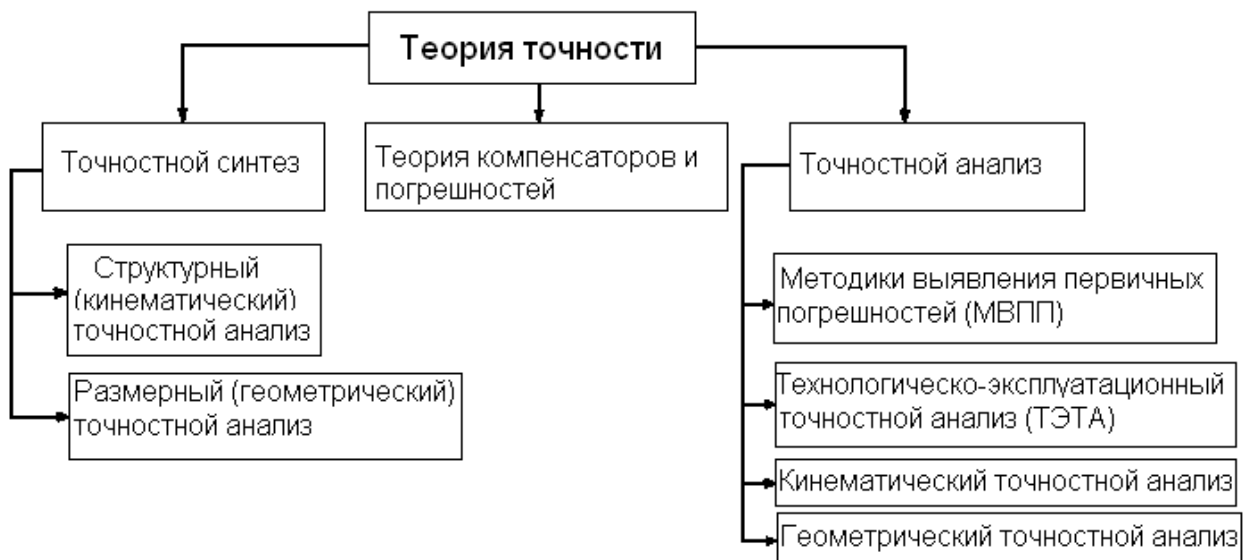
## 8. Регулирование измерительных устройств

Регулирование измерительных устройств - это процесс, предусматриваемый при проектировании измерительных устройств и имеющий целью приближение связей между выходным сигналом и входной величиной, заданной теоретической зависимостью.

Рычажные механизмы (синусный, тангенсный) имеют симметрическую кривую изменения погрешностей относительно начала положения. В них регулируют начальное положение (симметричность погрешности) и передаточное отношение (регулировка чувствительности). Это проводится при некоторых частных условиях, которые определяются следующим образом:

1. Нулевому показанию по шкале прибора должно соответствовать начальное положение механизма.
2. Номинальное передаточное отношение механизма принимается равным действительному передаточному отношению в начальном положении механизма.

## 9. Структура теории точности



## 10. Точностной синтез

Задача: разработка структуры измерительной цепи и выбор номинальных значений параметров этой цепи с целью уменьшения теоретической погрешности.

Известны две разновидности точностного синтеза:

1) структурный точностной синтез (кинематический), задачей которого является разработка структура с наименьшей теоретической погрешностью.

2) размерный (геометрический) точностной синтез, задачей которого является нахождение номинальных значений параметров, минимизирующих теоретическую погрешность.

### 10.1 Структурный точностной синтез

Основные положения осуществления:

1) Следует по возможности ограничить число преобразователей информации.

2) Если у нас в измерительной цепи несколько преобразовательных элементов с нелинейной функцией преобразования, то следует эти элементы располагать так, чтобы они хотя бы частично компенсировали нелинейность друг друга.

3) Лучше применять преобразованные элементы с симметричной функцией преобразования.

4) Необходимо грамотно располагать рабочие элементы относительно друг друга.

### 10.2 Размерный точностной синтез

С точки зрения минимума погрешности существует 3 категории измерительных устройств:

1) устройства первой категории отличается тем, что они должны иметь минимальную погрешность только при определенных значениях входного сигнала.

2) интегрирующие и суммирующие измерительные устройства, которые накапливают показания. Для этих минимум погрешностей – это минимум накопленной погрешности.

3) все остальные измерительные устройства, у которых при любом значении входного сигнала одинаково неприятна теоретическая погрешность. Для этой категории минимум модуля максимума погрешности:

$$|\Delta S_{\text{сх}}|^{\max} = \min;$$

Существует три метода размерного синтеза:

- 1) метод интерполирования
- 2) метод квадратичного приближения
- 3) метод наилучшего равномерного приближения.

### 10.2.1 Метод интерполирования

Номинальное значение параметров измерительной цепи отыскиваются из условия равенства нулю теоретической погрешности при определенных значениях входного сигнала, называемых узлами интерполирования.

Пусть  $s = s_1 s_2 s_3 \dots s_k$  - узлы интерполирования.

$$\begin{cases} \Delta S_{T1} = f(s_1, q_1) - f_T(s_1, c_j) = 0 \\ \Delta S_{T2} = f(s_2, q_2) - f_T(s_2, c_j) = 0 \\ \dots \\ \Delta S_{Tk} = f(s_k, q_i) - f_T(s_k, c_j) = 0 \end{cases}$$

$$i = 1 \dots n$$

$$k < n$$

Имеем систему из  $k$  уравнений с  $n$  неизвестными  $q_i$ .

При этом  $k < n$ , т.е. имеем статически неопределенную систему. Для синтеза оставляют те значения параметров, которые конструктивно можно реализовать регулируемы (легко поддается регулировке).

### 10.2.2 Метод квадратичного приближения

Номинальное значение параметров измерительной цепи выбирают из условия минимальности средней квадратической погрешности.

$$\Delta S_T^{кв} = \sqrt{\frac{I}{s_b - s_a}} = \min$$

$$I = \int_{s_a}^{s_b} [f(s, q_1) - f_T(s, c_j)]^2 ds = \min$$

$$\frac{\partial I}{\partial q_1} = 0; \quad \frac{\partial I}{\partial q_2} = 0; \dots \quad \frac{\partial I}{\partial q_n} = 0.$$

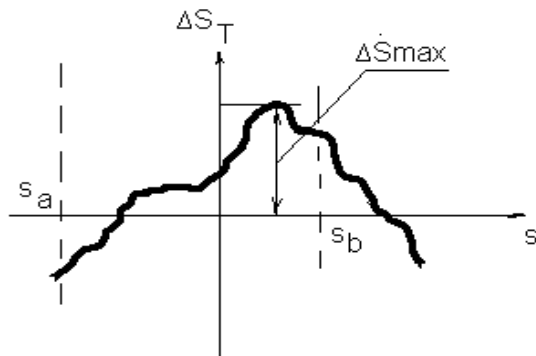
Многочлен степени  $n$ , который по сравнению с другими многочленами этой степени имеет наименьшее среднее квадратическое отклонение от 0 – это полином Лежандра типа  $F_n(x)$ . Эта функция точно отвечает условию  $\Delta S_T^{кв} = \min$ .

Полученное выражение для определения погрешности схемы приравнивается к полиному и определяют неизвестные параметры.

### 10.2.3 Метод наилучшего равномерного приближения

В этом методе параметры измерительной цепи отыскиваются из условия минимальности модуля максимума теоретической погрешности

$$|\Delta S_T|^{\max} = \min$$



Для решения этой задачи используются специальные полиномы Чебышева, которые на заданном диапазоне аргумента наименее отклоняются от 0.

Наиболее часто используются 3 полинома:

1)  $P_n(x) \rightarrow [-1; +1]$

2)  $R_n(x) \rightarrow [0; +1]$

3)  $Q_{2k}(x) \rightarrow [-1; +1]$

Теоретическую погрешность приравнивают к полиному и решают полученные уравнения.

## 11. Выявление первичных погрешностей

Под первичной погрешностью мы понимаем любое отклонение параметров цепи от расчетных, приводящие к искажению градуировочной характеристики.

Принято все первичные погрешности разделять на две категории:

- 1) скалярные первичные погрешности
- 2) векторные первичные погрешности.

Скалярные первичные погрешности отличаются тем, что направление их действия нам заранее известно, а значение их заранее предсказать нельзя, но оно может быть принято в пределах допуска.

Векторная первичная погрешность характеризуется неопределенным и непредсказуемым направлением действия. В отличие от скалярной первичной погрешности, векторная является как бы дважды случайной: ее значение – любое в пределах допуска, а направление действия – любое в пределах зоны действия.

Методика рассмотрения первичных погрешностей механизма, предложенная академиком Н.Г.Бруевичем, позволяет строго определить возможное число первичных погрешностей каждого звена и механизма в целом.

### **11.1 Методика академика Н.Г. Бруевича**

Методика базируется на двух принципах:

1) Принцип независимости действия погрешностей. Первичные погрешности являются взаимонезависимыми, т.е. значение одной погрешности не определяет значений других. Этот принцип позволяет при суммировании погрешностей пользоваться принципом суперпозиции.

2) Принцип координирования, заключается в том, что все первичные погрешности отсчитываются в единой для всего исследуемого механизма системе координат.

По методика Бруевича самая мелкая рабочая часть механизма – элемент кинематической пары. Методика включает в себя 3 пункта:

1) элемент кинематической пары может привести столько первичных погрешностей, сколько независимых параметров определяют форму, размеры и положение этого элемента в обобщенной системе координат.

2) звено может дать столько первичных погрешностей, сколько дадут вместе все элементы кинематических пар, принадлежащих этому звену.

3) количество первичных погрешностей механизма равно сумме числа первичных погрешностей всех звеньев этого механизма.

Наиболее удобной системой координат по Бруевичу является система координат, связанная с ведомым звеном.

Достоинства:

1.формализована

2.методика позволяет найти и учесть все первичные погрешности

Недостатки:

1.методика всегда дает громадное число первичных погрешностей, и простота методики в поиске погрешностей вырождается в очень сложный анализ

2.методика дает возможность выявлять лишь погрешности размеров и погрешности взаимного расположения при игнорировании погрешностей формы.

Методика выявления первичных погрешностей рекомендуется при исследовании механизмов приборов имеющих простые формы элементов кинематических пар: плоскости, сферы, точки цилиндра. В подобных случаях форма элементов может быть выявлена с высокой точностью, и ее изменения не могут заметно отразиться на работе прибора, особенно в динамическом режиме и, следовательно, не возникает необходимости в установлении связи между отклонениями формы кинематических элементов и погрешностями процесса образования этих поверхностей.

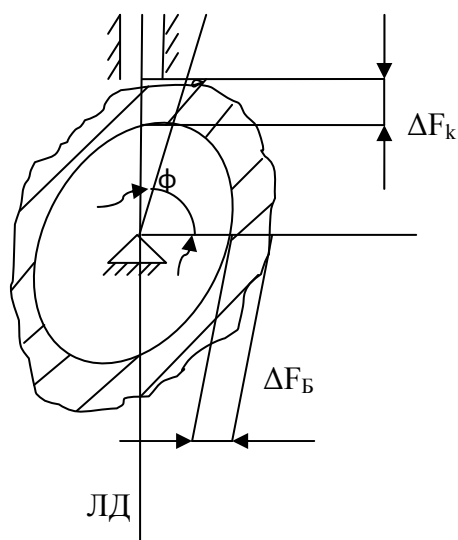
### **11.2 Методика профессора Н.А. Калашникова**

Действующей погрешностью кинематической пары называется погрешность размеров или формы элементов пары, непосредственно проявляющаяся в работе. Понятие



действующей погрешности, введенное профессором Калашниковым, является основой разработанной им теории реальных механизмов.

В высших кинематических парах, ввиду последовательного сопряжения поверхностей, должна рассматриваться непрерывно действующая погрешность.



Для нахождения значения и характера изменения действующей погрешности необходимо учитывать, что взаимодействие между профилями элементов кинематической пары находят по линии действия, проходящей в каждый момент через точку взаимодействия элементов и совпадающей с направлением рабочего усилия. Для действующей погрешности характерно то, что она является комплексной, т.е. погрешностью, отражающей суммарное действие всех погрешностей звена. Комплексную действующую погрешность не следует понимать как полученную в результате суммирования отдельных первичных погрешностей. Наоборот, первичные погрешности должны рассматриваться как частные погрешности общей функциональной погрешности звена, на которые ее раскладывают.

Данная методика наиболее эффективна применительно к сложным поверхностям, получаемых кинематическим путем (кулачки, зубчатые колеса, ходовые винты и т.д.).

## 12. Методы отыскания коэффициентов влияния и конечных погрешностей

Коэффициент влияния – это отношение изменения сигнала на выходе измерительного устройства к вызывающей его первичной погрешности.

$$T_i = \frac{\partial S}{\partial q_i}$$

### 12.1. Метод дифференциальный

Часто применяют для определения влияния различных составляющих величин на выходной сигнал, математически выраженный через величины, входящие в передаточную функцию.

Коэффициент влияния отыскивается как частная производная градуировочной характеристики идеальной измерительной цепи по соответствующему параметру.

$$S = f(\Delta, q_i);$$

$$dS = \frac{\partial S}{\partial q_1} dq_1 + \frac{\partial S}{\partial q_2} dq_2 + \dots + \frac{\partial S}{\partial q_n} dq_n;$$

$$\Delta S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial S}{\partial q_i} \right) \Delta q_i;$$

$$\Delta S_{\Sigma} = \sum T_i \Delta q_i;$$

$$T = \frac{\partial S}{\partial q_i};$$

Сущность дифференциального метода заключается в том, что составляются уравнения механизма, т.е. уравнения положения или перемещения ведомого звена в зависимости от координаты ведущего звена; затем дифференцированием его в частных производных, и полученный полный дифференциал есть ошибка положения или перемещения механизма.

Коэффициент влияния определяет долю влияния конкретной погрешности на суммарную.

Достоинства метода:

1. Метод является универсальным, т.е. пригоден для исследования измерительных цепей, составленных из любых преобразовательных элементов.

2. Может быть использован при исследовании группы однородных механизмов.

3. Является самым точным

Недостатки метода:

1. Требуется знание градуировочной характеристики

2. С помощью метода нельзя отыскать коэффициент влияния нулевых параметров.

Указанные недостатки дифференциального метода ограничивают его применение при исследовании измерительных устройств, в которых существенное значение имеют погрешности формы кинематических элементов, их взаимное положение, т.е. те факторы, которые формируют нулевые параметры.

## 12.2 Метод преобразованной цепи

Этот метод совместно с методикой рассмотрения первичных погрешностей является основой теории точности механизмов, разработанной академиком Н.Г. Бруевичем.

Метод позволяет графически, графоаналитически, аналитически находить коэффициенты влияния первичных погрешностей по всем параметрам механизма, минуя отыскание функции положения механизма.

- По Бруевичу коэффициент влияния первичной погрешности отыскивается как передаточное отношение преобразованного механизма.

- Преобразованным называется механизм с точно выполненными звеньями, у которого ведущие звенья закреплены (т.е. неподвижны), а звенья, имеющие погрешность, преобразованы в ведущие, с направлением движения, совпадающим с направлением рассматриваемой первичной погрешности.

Достоинства метода:

1. Универсален
2. Не нужна градуировочная характеристика
3. Можно найти коэффициент влияния нулевых параметров.
4. Даёт возможность отыскать коэффициент влияния экспериментально.

Недостатки метода:

1. Необходимо столько преобразуемых цепей, сколько исследуется первичных погрешностей.

### **12.3 Определение погрешности механизмов методом планов малых перемещений**

Профессором В.А. Шишковым разработан метод, позволяющий решать задачу нахождения влияния всех отклонений звеньев на погрешность положения ведомого звена путём построения единого плана малых перемещений. В этом методе отыскивается не коэффициент влияния. А суммарная погрешность как результат действия всех первичных погрешностей.

Единый план строят без применения предоставления о преобразованном механизме, используя схему данного механизма.

Этот метод в большей степени унифицирует известные понятия и приёмы, применяемые при построении планов скоростей. Упрощает построение и позволяет в комплексной форме учесть влияние всех отклонений сложного механизма. Отличительными особенностями плана малых перемещений являются:

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. Исходное перемещение точек является величинами независимыми друг от друга и вызваны отклонением длин звеньев, смещением центров в шарнирах.

Эти исходные перемещения при построении планов малых перемещений дополняются перемещениями, обусловленными связями в механизме.

Идея метода: замыкаем вход и образуем столько новых, сколько мы исследуем первичных погрешностей. Выход такой же, как в исследуемом механизме. Получается механизм со многими ведущими звеньями.

При реализации метода принимаются следующие допущения:

1. Перемещения ведомого звена обуславливаются только значениями первичных погрешностей и кинематическими связями механизма.

2. Все первичные погрешности (новые входы независимы друг от друга).

3. Значения всех первичных погрешностей много меньше значений параметров, следовательно, считаем направления звеньев реального механизма совпадающими с направлением звеньев идеального механизма.

4. Смещение точек механизма отыскивается в двух направлениях: нормальном и тангенциальном.

5. Все погрешности отыскиваются в единой системе координат, которая обязательно связана с элементом стойки, контактирующей с ведомым звеном. Элемент стойки считается идеальным.

6. Суммарная погрешность отыскивается графически с помощью плана малых перемещений, который строится по тем же закономерностям, что и планы скоростей и ускорений.

Если использовать принцип суперпозиции, то метод модернизируется, и можно отыскать коэффициент влияния, предположив, что у нас действует одна первичная погрешность.

Достоинства метода:

1. Универсален
2. Не требует знания градуировочных характеристик.
3. Нет необходимости в преобразованном механизме.

Недостатки:

Невысокая точность.

## 12.4 Метод фиктивной нагрузки

Предложен доцентом Любатовым. Используется для исследования только механизмов.

Суть метода: исследуемый механизм нагружается единичной фиктивной нагрузкой, причём эта нагрузка прикладывается к ведомому звену таким образом, чтобы она увеличивала значение выходного сигнала. В качестве единичной фиктивной нагрузки берётся сила  $\Phi$ , если звено движется поступательно, и единичный фиктивный момент  $M$ , если звено совершает вращательное движение. Метод базируется на теореме о сумме возможных работ (принцип Д'Аламбера). Сумма возможных работ на бесконечно малых перемещениях для механизма, находящегося в покое, равна нулю. В качестве возможных перемещений принимаются первичные погрешности.

$$\Delta S_{\Sigma} \Phi + \sum_{i=1}^n \bar{F}_i \Delta q_i = 0;$$

$$\Delta S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (-\bar{F}_i) \Delta q_i;$$

$$\Delta S_{\Sigma} = \sum T_i \Delta q_i;$$

$$T_i = \bar{F}_i$$

Достоинства метода:

1. Самый быстрый из всех существующих методов.
2. Нет необходимости в градуировочной характеристике и преобразованном механизме.
3. Пригоден для исследования как единичного экземпляра, так и группы однородных механизмов.

Недостатки метода:

1. Не обладает высокой точностью.
2. Разработан только для механизмов.

## 12.5 Геометрический метод

Применяют для исследования точности только механизмов. Все соотношения между погрешностью ведомого звена и первичными погрешностями звеньев находятся на основании геометрических построений. Суть метода: 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 другой раз – при её наличии. Эти построения механизма выполняются при резко увеличенных значениях первичных погрешностей.

При выводе формул, связывающих погрешность механизма с первичными погрешностями, вводят ряд упрощений, сущность которых заключается в исключении погрешностей второго порядка малости (линеаризация погрешности выходного сигнала).

Это выражается в следующем: в независимом рассмотрении каждой первичной погрешности и в использовании ряда приближений, из которых наиболее часто используются следующие:

1) Синус малого угла принимают равным малому углу:  $\sin \Delta \alpha = \Delta \alpha$

2)  $\operatorname{tg} \Delta \alpha = \Delta \alpha$

3)  $\cos \Delta \alpha = 1$

4) Тангенс, синус и косинус суммы значительного или малого угла равны соответственно тангенсу, синусу и косинусу значительного угла.

Малый угол – это угол, вызванный первичной погрешностью при значении катета и гипотенузы не менее, чем на 4, а в крайнем случае – на 3 порядка больше, чем порядок погрешности.

Достоинства метода:

1. Не требует градуировочной характеристики.
2. Нет необходимости в преобразованном механизме.
3. Для сложных механизмов достаточно трудно найти передаточное отношение между первичной погрешностью и погрешностью положения ведомого звена. Этот метод избавляет от этого.

Недостатки метода:

1. Неуниверсален.
2. Невысокая точность.

## 12.6 Метод относительных погрешностей

В некоторых случаях функция преобразования измерительного устройства выражается произведением нескольких множителей и является постоянной величиной, не зависящей от изменения входной величины. Для таких случаев может быть применён метод относительных погрешностей. Механизмы, состоящие из рычагов или фрикционных передач, нередко исследуют и рассчитывают, используя понятие об относительной погрешности. Различают два вида относительных погрешностей: радиальная погрешность и тангенциальная погрешность.

Относительной радиальной погрешностью называют частное от деления абсолютного отклонения радиального размера на номинальное значение этого размера.

Для относительной радиальной погрешности характерно то обстоятельство, что в последовательной передаче, в независимости от принадлежности отклонения к любому звену, погрешность имеет постоянный коэффициент влияния  $\pm 1$ .

Выходные параметры многих преобразовательных элементов измерительных устройств выражаются сложной степенной зависимостью через величины его отдельных параметров: пружины, мембранные коробки, сильфоны, индуктивные преобразователи и т.д.

Выходной сигнал:  $S = f(q_i)$ .

Относительная ошибка:  $E = \frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta f(q_i)}{f(q_i)} = d \ln f(q_i)$ , т.е. относительная ошибка функции равна дифференциалу натурального логарифма этой функции. Аналогично, что если функция зависит от нескольких параметров, то максимальное значение относительной ошибки результата равно полному дифференциалу натурального логарифма функции, причём при вычислении дифференциала следует брать сумму абсолютных значений дифференциалов всех членов логарифма (т.е. все частные ошибки складываются).

Пример: расчёт усилия винтовых цилиндрических пружин производится по формуле:

$$P = \frac{G \cdot d^4 \cdot \lambda}{8 \cdot D_0^3 \cdot l}$$

P- осевое усилие пружины.

G- модуль сдвига материала.

d- диаметр проволоки.

$\lambda$ - ход пружины.

$D_0$ -средний диаметр, D- наружный диаметр пружины.

i – число рабочих витков пружины.

$$D_0 = D - d$$

Находим натуральный логарифм P:

$$\ln P = \ln G + 4 \ln d + \ln \lambda - 3 \ln D_0 - \ln i - \ln 8$$

Находим дифференциал этого выражения: причём в правой части берём сумму абсолютных значений его членов

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta G}{G} + 4 \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + 3 \frac{\Delta D_0}{D_0} + \frac{\Delta i}{i}$$

Учитывая вероятностный характер проявления первичных погрешностей, суммарную относительную погрешность осевого усилия пружины находят квадратическим сложением членов приведенного выражения:

$$\frac{\Delta P}{P} = \sqrt{\left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2 + \left(4\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(3\frac{\Delta D_e}{D_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2}$$

### 12.7 Метод плеча и линии действия

Данный метод разработан профессором Н.А. Калашниковым, в созданной им теории реальных механизмов, применительно, главным образом, к механизмам с высшими парами (зубчатые, кулачковые и другие).

По этой теории погрешности механизма можно представить как приращение обобщенного плеча, перпендикулярного к линии действия некоторой обобщенной силы. Метод предназначен для определения суммарной погрешности.

Недостаток: метод пригоден для исследования только механизмов.

Суть метода: при исследовании реальных механизмов по Калашникову, любой механизм представляют как совокупность простейших. За прототип простейшего механизма принимают линию действия и соответствующие ей плечи (плечо). Линия действия – линия, по которой передаётся действие элементов звеньев. Плечо – перпендикуляр, опущенный из оси вращения звена на соответствующую линию действия.

Различают погрешности, возникающие в процессе изготовления и эксплуатации механизма, которые вызывают общее избыточное приращение по линии действия, состоящее из трёх составляющих.

1.  $\Delta F_r$  – приращение, вызванное избыточным изменением обобщенного плеча в следствии нарушения процесса образования рабочей поверхности и из-за погрешностей подвижных звеньев механизма.

2.  $\Delta F_{л.д.}$  – приращение, создаваемое погрешностями, направленными по линии действия или параллельно ей.

3.  $\Delta F_{н.з.}$  – приращение, создаваемое погрешностями неподвижных звеньев механизма.

$$\overline{F_z} = \overline{\Delta F_r} + \overline{\Delta F_{л.д.}} + \overline{\Delta F_{н.з.}}$$

### 13. Влияние векторных первичных погрешностей на показания измерительного устройства

Векторными первичными погрешностями называются погрешности, характеризующиеся некоторым направлением и некоторым числовым значением. Они выражают первичные погрешности относительного положения геометрических элементов в звеньях и кинематических парах и относятся только к нулевым параметрам механизма, то есть к таким, номинальные размеры которых до образования первичной погрешности равны нулю. Эти параметры существуют в механизме, как бы потенциально, проявляясь только в момент образования ошибки.

Механизмы бывают плоские и пространственные. Первичная погрешность может возникать в плоскости его движения (первичные погрешности эксцентриситета или плоского переноса) и не в плоскости его движения (пространственного переноса).

Векторные первичные погрешности образуются из ошибок в технических условиях на изготовление и сборку механизма.

Все векторные первичные погрешности можно свести к двум группам:

1. погрешности эксцентриситетов и перекосов геометрических элементов в звеньях.
2. погрешности эксцентриситетов и перекосов в кинематических парах.

Для векторных погрешностей характерно не только непостоянство модулей, но и непостоянство их направлений, что делает весьма затруднительным регулирование этих погрешностей.

Каждую плоскую векторную погрешность можно пересчитать в одну или две скалярные первичные погрешности. В одну – проецируя её на линию действия сил. В две – находя составляющие по осям звеньев или же линиям движения точек по ним.

Любая векторная погрешность пространственного перекоса может быть пересчитана в две скалярные первичные погрешности, для этого она должна быть переведена в плоскость движения механизма. Для этого используется множитель, равный косинусу угла, составленного направлением первичной погрешности с плоскостью движения механизма. Вследствие случайности модуля и направления векторной первичной погрешности она пересчитывается в случайные скалярные первичные погрешности.

В зависимости от требуемой точности расчёта векторную первичную погрешность можно представить в виде:

1. максимальной первичной погрешности, принимая для неё наиболее неблагоприятные направления по линии движения одной из точек для данного положения механизма;
2. некоторого среднего значения первичной погрешности, полученного с помощью теории вероятности, если функция распределения направления векторной первичной погрешности и ее величина известны или гипотетически предполагаются.

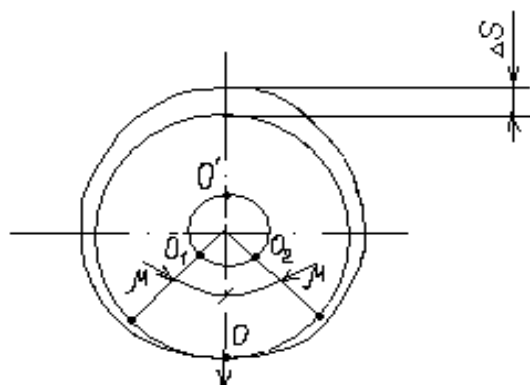
#### **14. Погрешности механизма, вызванные неточностью направляющих**

На долю направляющих приходится около половины всех кинематических пар механизмов. Поэтому рассмотрение способов учета влияния неточностей направляющих на погрешность движения направляемых звеньев является весьма актуальным. 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.



## 14.1 Учет влияния зазора во вращательной паре



При наличии зазора шейка шарнира и отверстия будут располагаться несоосно.

При этом положение подвижного элемента определяется направлением равнодействующей сил, действующих в сочленении.

Равнодействующая сил соответствует реакции шарнира и проходит через точку касания обоих элементов пары. В процессе вращательного движения звена изменяется

направление действия 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, вызванная смещением оси шарнира в пределах зазора. Эта погрешность определяется:

$$\Delta F_{\text{вм}} = T_j \cdot \Delta S_{\text{баз}} \quad (*)$$

$$\text{где } T_j = \frac{\sin \tau}{\sin \tau_1} \quad (**)$$

$\Delta S_{\text{баз}}$  - действующее смещение идеального центра вращения;

$T_j$  - коэффициент влияния смещения центра;

$\tau, \tau_1$  - находятся из схемы преобразованного механизма.

Формулы (\*) и (\*\*) являются универсальными при сохранении требований к дефектному перемещению  $\Delta S_{\text{баз}}$  и расстановке углов  $\tau$  и  $\tau_1$ .

Смещение идеального центра вращения направляющей следует рассматривать для трех видов вращательных направляющих:

- 1) на опорах скольжения;
- 2) на опорах качения;
- 3) на упругих опорах.

Для опор скольжения характерным является смещение идеального центра цапфы из центрального положения относительно отверстия на размер  $\Delta S/2$ , где  $\Delta S$  - зазор по направлению действующей реакции.

Если при реверсировании работы механизма направление действия реакции отклоняется из-за сил трения на угол  $\pm \mu$ , то вызываемая этим реакция перемещения центра будет определяться:

$$\Delta S_{\text{баз}} = \frac{\Delta S}{2} \cdot \frac{\mu^2}{2}$$

В наихудшем случае, когда не будет иметь место перекатывание (скатывание) 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  $O'$ . При этом проекция перемещения центра цапфы равна величине полного зазора:

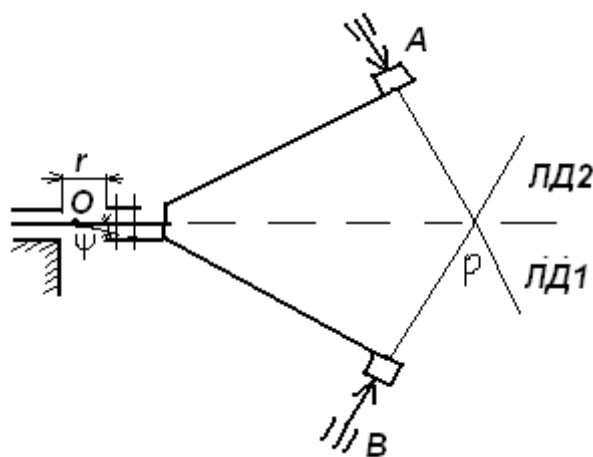
$$\Delta S_{\text{баз}} = \Delta S$$

При вращательных направляющих, выполненных на опорах качения, следует принимать во внимание как размер радиального зазора в подшипниках качения  $\Delta S$ , так и размер радиального биения  $E$  наружного кольца относительно внутреннего. В этом случае размер перемещения звеньев:

$$\Delta S_{\text{баз}} = \Delta S + E$$

Для вращательных направляющих, выполненных на упругих опорах, следует также учитывать проекции смещения центра поворота в процессе движения звена. При этом можно воспользоваться исследованиями А.Т.Драудина, в которых получены следующие результаты:

- для одиночной плоской пружины

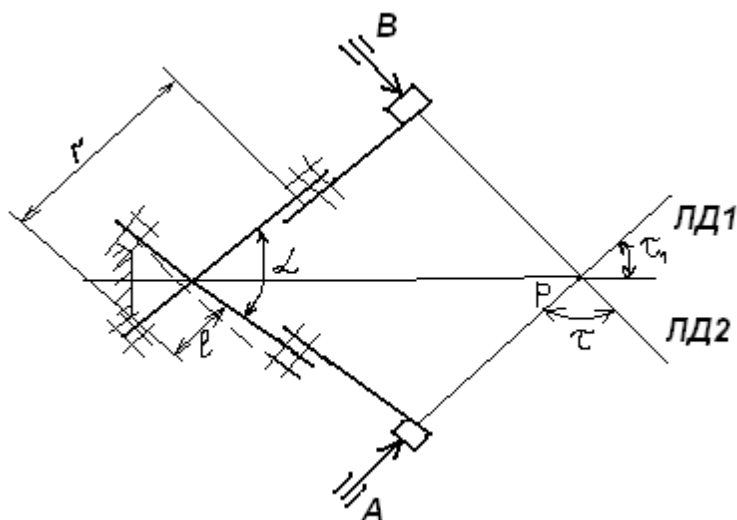


При базовой линии, направленной вдоль оси пружины, проекция смещения идеального центра  $O$  при повороте на угол  $\psi$  от нейтрального положения определяется:

$$\Delta S_{\text{баз}} = \frac{1}{12} r (\psi + 0,02)^2$$

где  $r$  – длина свободного участка пружины.

- для крестообразного упругого шарнира



При базовой линии, направленной вдоль оси продольной симметрии, проекция смещения центра на ось продольной симметрии (базовую ось)

$$\Delta S_{\text{баз}} = B_x \Psi^2 r V$$

$$B_x = 0,212(1,75 - k)(k - 0,25)$$

$$k = \frac{al}{r}, V = \frac{0,707}{\cos \frac{\alpha}{2}}$$

$l$  – большее расстояние от центра  $O$  до заделки.

При  $l = \frac{r}{2}$  и  $\alpha = 90^\circ$   $k=1$ ,  $V=1$ , следовательно:

$$\Delta S_{\text{баз}} = 0,12 \Psi^2 r,$$

где  $\psi$  – угол отклонения от нейтрального положения.

#### 14.2 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  $P$ .
- 2) линии действия рабочих точек звена параллельны между собой.

1 случай: линии действия пересекаются.

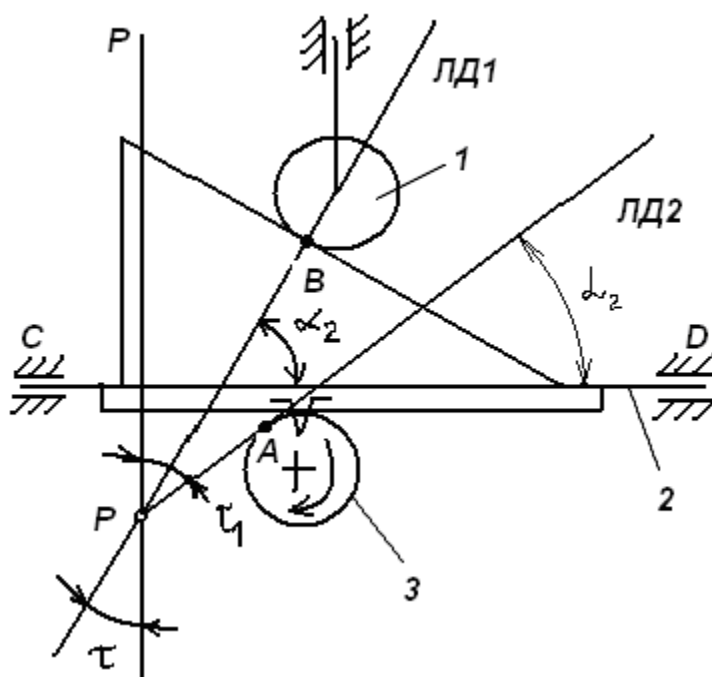
В случае, когда линии действия пересекаются в точке  $P$ , особенности рассмотрения проявления погрешностей для поступательных направляющих связаны с тем, что центр мгновенного поворота точка  $O$  удален в бесконечность, и базовая линия  $P-P$  проходит через точку  $P$ , перпендикулярно к траектории идеального движения.

С учетом этой особенности могут быть использованы для расчета ранее рассмотренные формулы:

$$\Delta F_{\text{эм}} = T_j \cdot \Delta S_{\text{баз}}$$

$$T_j = \frac{\sin \tau}{\sin \tau_1}$$

Здесь под  $\Delta S_{\text{баз}}$  следует понимать погрешность траектории точки Р или любой другой точки, лежащей на нормали Р-Р.



На рисунке показан механизм с поступательно движущимся звеном 2. Это звено снабжено зубчатой рейкой, зацепляющимся в точке А с зубчатым колесом 3, приводящим в движение весь механизм. На звене 2 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 Р-Р проведена через точку Р, перпендикулярно к траектории движения звена 2.

Погрешности направляющих С и D должны быть приведены к дополнительному перемещению  $\Delta S_{\text{баз}}$  вдоль линии Р-Р. Перемещения должны учитывать при расчете избыточного приращения по выходной линии ЛД2 по известной формуле:

$$\Delta F_{\text{эм}} = T_j \cdot \Delta S_{\text{баз}}$$

$$T_j = \frac{\sin \tau}{\sin \tau_1}$$

Отметим, что при контроле непрямолинейности хода направляемого звена 2 механизма погрешность  $\Delta S_{\text{баз}}$  следует измерять по базовой линии Р-Р.

При расчете погрешности направляющей удобно пользоваться углами, отсчитываемыми между линиями действия и линией движения.

$$\tau = \alpha_1 - \alpha_2$$

$$\tau_1 = 90^\circ - \alpha_1$$

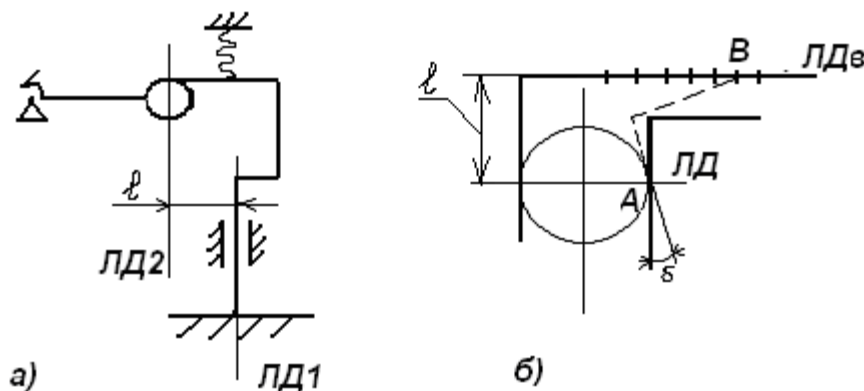
$$T_j = \frac{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)}{\cos \alpha_1}$$

2 случай. Линии действия параллельны.

Если линии действия рабочих точек параллельны, то тогда формула

$$T_j = |\operatorname{tg} \alpha_1 \cos \alpha_2 \pm \sin \alpha_2|$$

для определения коэффициентов влияния не годна, т.к.  $\alpha_1 = \alpha_2$ , следовательно,  $T_j = 0$ . Кроме того не может быть применено и понятие о базовой линии, т.к. не только центр поворота удален в бесконечность, как это было в случае прямолинейного поступательного перемещения, но и отсутствует точка пересечения двух линий действия.



На рис.а 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.б показана направляющая в виде штанги и рамки штангенциркуля. Через рабочую точку А проходит линия действия ЛД, а в точке В расположен отсчетный индекс для снятия отсчета по линейной шкале, с которой совпадает и линия движения ЛДв. Возникающая погрешность на выходе вследствие погрешности направляющей пары связано с возникновением перекоса направляемого звена на угол  $\delta$  и расстоянием  $l$  между линиями действия.

$$\Delta F_{см} = l\delta$$

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.

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 перемещения кареток.

## 15. Сетка влияния конечных погрешностей

Это совокупность графиков, показывающих изменение всех конечных погрешностей в зависимости от значения входного сигнала, причем графики для всех конечных погрешностей можно построить в одной или в разных координатных сетках, но обязательно в одинаковом масштабе. Значение каждой конечной погрешности подсчитывается при 3-8 значениях входного сигнала.

При построении сетки влияния следует иметь в виду:

1) на все параметры должны быть назначены допуски, определяемые расчетом по критерию функционирования либо определяемые из конструктивных соображений. При этом величина допуска каждого параметра должна быть принята экономически целесообразной.

2) векторные первичные погрешности учитываются как скалярные, причем направление их действия выбирают самым неблагоприятным образом с точки зрения формирования погрешностей (косинус принимают равным единице – самый худший случай).

3) все первичные погрешности считают симметрично распределенными относительно номинального значения параметра.

4) все первичные погрешности независимы друг от друга.

### 15.1 Анализ сетки влияния первичных погрешностей

№п/п	$\Delta i$	$T_i$			КПi		
		$T_{s_1}$	$T_{s_2}$	$T_{s_3}$	$КП_{s_1}$	$КП_{s_2}$	$КП_{s_3}$
1	2	3	4	5	6	7	8

1) Отыскивается доминирующая погрешность. Под доминирующей погрешностью понимают такую, которая имеет наибольшее абсолютное значение.

2) Сравниваем все остальные погрешности с доминирующей с целью выявления маловлияющих погрешностей.

Если  $\frac{K\Pi_1}{K\Pi_0} < 0,1$ , то погрешность может быть отнесена к маловлияющей, и можно ее исключить.

Определение ожидаемой суммарной погрешности, т.е. суммирование конечных погрешностей.

$$\Delta S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n K\Pi_i \rightarrow n \leq 4$$

$$\Delta S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (K\Pi_i)^2} \rightarrow n > 4$$

3) Сравнение суммарной ожидаемой погрешности с пределами допускаемой погрешности.

## 16. Технологическо - эксплуатационный точностной анализ механизмов

Данный анализ, главным образом, касается выявления производственных погрешностей изготовления деталей и определения степени их влияния на точность передачи движения механизмом. Он основывается на выбранном технологическом процессе изготовления деталей и должен отвечать на вопросы о том, как связана производственная погрешность размера или формы детали с первичной погрешностью, а допуск с действительным рассеиванием размера детали. Технологическо-эксплуатационный анализ рассматривает также вопросы, связанные с эксплуатацией приборов.

Задачами этого анализа являются:

1. Установление вида кривых распределения технологических погрешностей изготовления детали на станках.
2. Уточнение связи между величиной рассеивания ошибок изготовления деталей и полем допуска (выбор коэффициентов  $\alpha, \lambda$ ).
3. Уточнение величин допусков и их окончательный выбор.
4. Определение эксплуатационных ошибок (упругих, температурных деформаций).
5. Определение величины ошибки мертвого хода.

Определение ошибки мертвого хода отнесено к данному анализу потому, что мертвый ход связан с вероятностными величинами зазоров в подвижных сопряжениях, определение которых является предметом технологического точностного анализа, и упругими деформациями звеньев, что непосредственно связано с условиями эксплуатации механизма.

### 16.1 Технологические составляющие первичных погрешностей механизма

К технологическим составляющим первичных погрешностей относятся погрешности изготовления и сборки деталей механизма, вызывающие дополнительные перемещения ведомого звена. Различают следующие виды погрешностей изготовления деталей: погрешности размеров, формы, относительного расположения поверхностей детали, погрешности связанные с шероховатостью. Источником технологических погрешностей изготовления деталей может быть множество причин связанных с оборудованием, режущим и измерительным инструментом, деформациями, изменением твердости

обрабатываемой детали, изменением внешних условий. Технологические погрешности в основном случайны.

## **16.2 Оценка законов распределения технологических первичных погрешностей**

Можно указать 3 способа оценки законов распределения производственных погрешностей, два из которых считаются экспериментальными, а один приближенно-табличным.

1-й способ. Заключается в оценке закона распределения технологической погрешности методом математической статистики в условиях реального производства.

2-й способ. Статистическое исследование финишных операций получения параметров. Базируется на предположении, что финишные операции обеспечивают точность измерительного устройства.

3-й способ. Табличный. Используется в проектном расчете. Заключается в использовании опыта предшествующих поколений.

Значительные работы в этом направлении выполнены профессором Бородачевым, на основе обследования различных технологических приемов обработки деталей и изучении исследований точности производства, проведенных другими технологами. Им схематизированы разные условия производства, которые приведены к 16-ти типам кривых распределения.

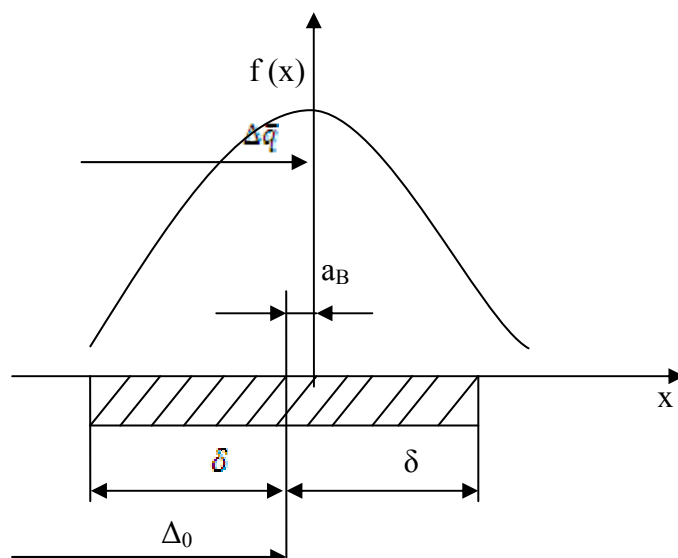
Стандартные аппроксимации функции распределения случайных составляющих погрешности измерения даны в ГОСТ 8.011. Обычно при ориентировочных расчетах ограничиваются двумя законами:

1. Закон нормального распределения для отклонения размеров (закон Гаусса).
2. Закон распределения существенно положительных величин (отклонения формы и взаимного расположения поверхностей).

## **16.3 Относительные числовые характеристики распределения первичных погрешностей**

Рассмотрим график рассеяния технологических погрешностей изготовления вала с величиной допуска по чертежу равным  $2\delta$ . По оси абсцисс отложены погрешности  $\Delta q$  размера вала, а по оси ординат - плотности вероятности рассеяния этих погрешностей, определенные опытным путем.





Смещение центра группирования действительного рассеяния размеров относительно середины поля допуска для наружного размера детали равно  $\alpha_B$ .

Абсолютные характеристики:

1.  $\Delta_0 = \frac{1}{2}(\Delta q_{\max} + \Delta q_{\min})$
2.  $\delta = \frac{1}{2}(\Delta q_{\max} - \Delta q_{\min})$
3.  $\Delta \bar{q}$
4.  $\sigma [\Delta q]$

Профессором Бородачевым были предложены относительные характеристики:

5.  $\alpha = \frac{\Delta \bar{q} - \Delta_0}{\delta}$  - относительная асимметрия

С помощью коэффициента  $\alpha$  Бородачев связал величину смещения  $\alpha_B = \Delta \bar{q} - \Delta_0$  центра группирования отклонения размера детали относительно середины поля допуска с величиной половины допуска. Этот коэффициент служит для определения величины систематической составляющей погрешности изготовления детали, которая равна  $\alpha_B$ .

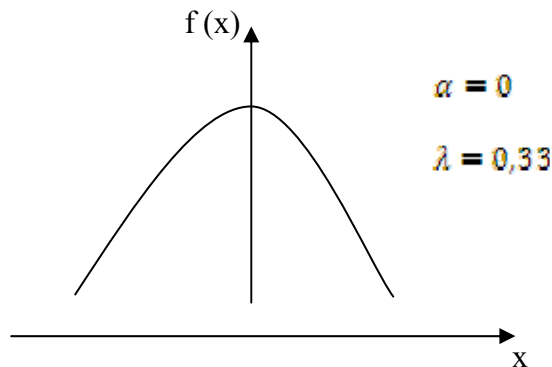
6.  $\lambda = \frac{\sigma[\Delta q]}{\delta}$  - относительное среднее квадратическое отклонение

Оба эти коэффициента  $\alpha$ ,  $\lambda$  зависят от способа обработки и состояния оборудования, а также от симметричности (несимметричности) рассеяния размеров детали относительно середины поля допуска, т.е.  $\alpha$ ,  $\lambda$  зависят только от вида закона распределения погрешности.

#### 16.4 Законы распределения технологических погрешностей

Изучение технологических погрешностей изготовления деталей ведется статистическими методами на основе выявления законов распределения этих погрешностей. Аналитическое выражение закона распределения технологических

погрешностей зависит от влияния исходных факторов технологического процесса, изготовления и сборки детали. В случае однородного влияния исходных факторов распределение погрешностей с одной производственной партии подчиняется закону нормального распределения.

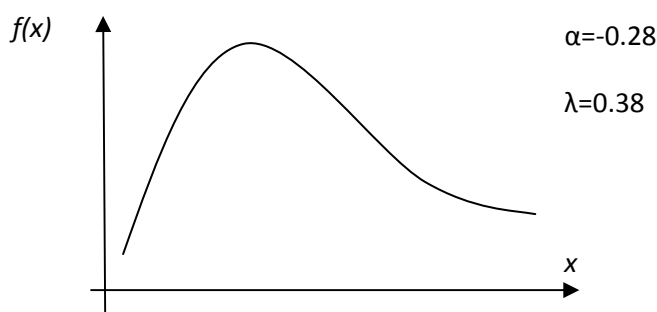


Рассеяние по закону Гаусса имеет место при следующих условиях возникновения погрешностей:

1. Общая погрешность является суммой частных погрешностей, вызванных действием значительного числа случайных и некоторого числа систематических первичных факторов.
2. Число случайных факторов и параметры вызванных ими частных погрешностей могут изменяться во времени, но обязательно должны быть взаимнонезависимы.
3. Все случайные факторы по своему влиянию на общую погрешность одного порядка, т.е. доминирующих факторов нет.
4. Число систематических факторов и значения, вызванных ими частных погрешностей, остаются одинаковыми для всех экземпляров одной производственной партии, выполненных на одном станке, при одной настройке и т.д.

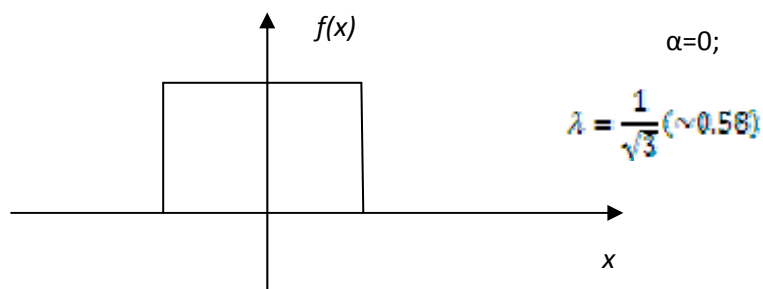
Однако случайные условия, которые должны сопутствовать возникновению распределения по закону Гаусса, зачастую нарушаются, и могут возникнуть факторы, имеющие доминирующие значения.

#### 16.4.1 Закон Максвелла, закон эксцентриситета



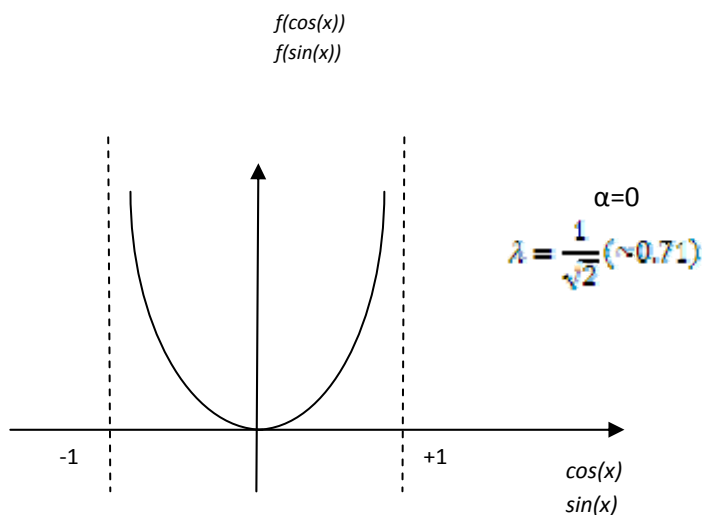
Ему подчиняются все существенно положительные погрешности (эксцентриситет, перенос, биение, погрешность формы).

### 16.4.2 Закон равномерной плотности или закон равной вероятности



Этому закону подчиняются погрешности изготовления угла и погрешности угловой координаты. Начальная фаза векторных погрешностей тоже подчиняется этому закону.

### 16.4.3 Закон арккосинуса



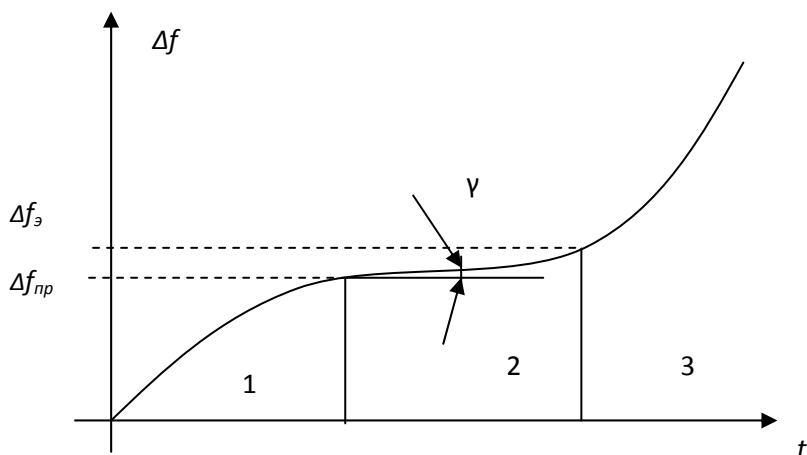
Этому закону подчиняются функции случайного аргумента  $\cos(x)$  и  $\sin(x)$ , если случайный аргумент  $x$  распределён по закону равномерной плотности. Также этому закону подчиняются коэффициенты влияния векторных погрешностей.

## 17. Эксплуатационные составляющие первичных погрешностей механизма

Эксплуатационные составляющие первичных погрешностей проявляются в процессе работы механизма. К ним относится: износ поверхностей, силовые и температурные деформации деталей, а так же смещение в зазорах подвижных сопряжений вызванные изменением направления действующих в механизме сил.

Эксплуатационные погрешности неподдающиеся расчёту учитываются по опытными данным.

## 17.1 Влияние износа на точность работы механизма



Процесс износа можно представить в виде кривой, выражающей количественную зависимость износа  $\Delta f$  от времени  $t$ .

Зона 1 графика соответствует начальной стадии износа, в которой происходит интенсивное смятие гребешков микропрофиля поверхности детали.

При этом несущая поверхность детали резко увеличивается (в первый момент она составляет около 0,001 от общей опорной геометрической площади). Удельное давление в этот период огромно. Предварительный износ  $\Delta f_{\text{пр}}$  поверхностей происходит при сборке и пробных испытаниях прибора. Он составляет от 20 до 60% от высоты гребешков микропрофиля.

Зона 2 соответствует эксплуатационному износу.

Зона 3 - выходу детали из строя (катастрофический износ).

Предварительный износ приводит к увеличению зазора в посадке, поэтому при особо точных расчётах ошибок механизма следует учитывать этот зазор, а также зазор, образующийся вследствие выдавливания смазки между трущимися поверхностями. Для уменьшения эксплуатационного износа принимаются следующие меры: повышение шероховатости для подвижных соединений, выбираются пары антифрикционных материалов, трение скольжение заменяют трением качения, если трущимися материалами являются металлы, то применяют различные смазки.

## 17.2 Деформации деталей

Наиболее типичными для механизмов приборов являются следующие деформации: от собственного веса, от внутреннего напряжения, от внешней нагрузки и температурная.

**От собственного веса.** Сила веса может вызывать в детали, а, следовательно, и в звене, деформации растяжения, сжатия, изгиба или кручения в зависимости от расположения центра тяжести относительно опор. С точки зрения точности опасны не столько сами деформации, сколько их изменение в процессе работы механизма. Деформации от собственного веса могут стать переменными, если будут изменяться осевые моменты инерции, либо положение центра тяжести звена относительно его опор. В основном учитываются для крупных деталей, а также для деталей характеризующихся значительным выносом центра тяжести от оси вращения (стрелки измерительных приборов).

**От внутренних напряжений.** Внутренние напряжения возникают в процессе изготовления детали, могут быть объёмными (после холодной штамповки, волочения, литья,ковки, сварки, закалки и т.д.) или поверхностными ( после всех операций резания и калибрования). Первые распространяются по всему объёму детали, другие распределяются на небольшой глубине от поверхности. Внутренние напряжения практически не поддаются расчёту, так как неизвестен характер их распределения, но они существуют и вызывают изменение размеров и формы детали. Особенно опасны объёмные деформации от внутренних напряжений, которые могут быть незаметны в процессе изготовления прибора (если цикл изготовления прибора значительно меньше срока старения материала), но они проявляются в период его эксплуатации. Для уменьшения объёмных напряжений следует выбирать материалы с устойчивой структурой и применять искусственное старение материала. Особенно большие внутренние напряжения возникают при закалке. Поэтому детали сложной формы следует подвергать лишь поверхностной закалке или применять другие методы упрочнения поверхности.

**От внешней нагрузки.** Величины этих деформаций можно рассчитать если известен характер изменения нагрузки. В приборных мелко модульных зубчатых передачах применяют валики небольшого диаметра от 1,5 до 10 мм при крутящем моменте в несколько Н\*м, что создаёт соразмерные с общей погрешностью механизма деформации от скручивания валиков, а также изгиба и сдвига штифтов.

Существуют способы определения этих деформаций. Для штифтового соединения величина деформации скручивания равна:

$$\Delta\varphi_{\tau} = (M_k - M_T)K_{\text{ш}}$$

где  $K_{\text{ш}}$  – коэффициент пропорциональности рад/Н\*м, зависит от диаметра валика и максимальной высоты микронеровностей штифтового отверстия.

$M_k$  – передаваемый соединением крутящий момент.

$M_T$  – момент трения между валиком и ступицей колеса.

### Температурная деформация

Температурные деформации ( $\Delta l_{\Delta t}$ ), вызванные изменением температуры детали можно определить по формуле:

$$\Delta l_{\Delta t} = l * \alpha * \Delta t$$

$l$  – размер детали.

$\alpha$  – коэффициент линейного расширения детали.

$\Delta t$  – перепад температур детали.

Особенно чувствительны к температурным деформациям такие приборы как: телескопы, измерительные машины, теодалиты, ганиометры.

В установившемся тепловом режиме возможны два варианта распределения температуры: 1. постоянна температура, 2. постояннен градиент температуры. Расчёт температурной деформации возможен в обоих случаях. Расчёт температурных деформаций не возможен при неустановившемся тепловом режиме. Тогда задачей конструктора является сведение к минимуму влияния температуры на точность прибора.

Этого можно добиться следующими способами: подбор материалов с близкими коэффициентами линейного расширения, оградить детали и весь прибор от температурного влияния окружающей среды (теплоизоляция, термостатирование, экранизация, применение конструктивных температурных компенсаторов).

## 18. Расчет точности партии однородных измерительных устройств

При расчете точности партии изготавливаемых измерительных устройств имеют дело не с конкретными величинами, или же законами изменения первичных погрешностей, а располагают лишь допусками, ограничивающими предельными значениями возможных первичных отклонений элементов прибора. Очевидно, что при сборке деталей механизма все отклонения размеров годных деталей будут находиться в пределах заданных допусков. То же самое относится к динамическим и температурным погрешностям, ограниченными возможными пределами, а внутри этих пределов они могут иметь любое значение. Так как погрешности, действующие в каждом экземпляре прибора и при определенных условиях его использования могут иметь любые значения, лежащие в пределах допуска, то при расчете точности измерительных устройств следует считать эти погрешности случайными величинами (функциями). Суммирование влияния отдельных погрешностей на результирующую точность прибора не должно исходить из алгебраического сложения действия наибольших возможных отклонений, лежащих в границах допуска. Трудно ожидать столь неблагоприятного одновременного сочетания неточностей. В обычных условиях сборки прибора можно ожидать, что в каждый экземпляр прибора попадут детали с отклонениями, лежащими в разных участках полей допуска. Для учета влияния случайного характера погрешностей звеньев механизма необходимо суммировать действие всех отклонений на основе теории вероятности. Сущность этого метода заключается в учете не только значения отклонения, но и вероятности его появления. Это обстоятельство позволяет не учитывать ряд крайних значений, имеющих малую вероятность появления. Следовательно, использование метода теории вероятности дает значение лучше согласующееся с практически наблюдаемыми величинами, чем те значения, которые были найдены при расчете на возможный максимум - минимум погрешности прибора.

Основная задача технологического точностного анализа - это учет распределения технологических погрешностей в пределах их полей допусков. Эту задачу можно разбить на несколько частных задач:

1. Оценка закона распределения первичных погрешностей.
2. Построение точечной и интервальной оценок суммарной погрешности.
3. Выбор способа уменьшения суммарной погрешности.

Чтобы решить вторую задачу представим суммарную погрешность в следующем виде:

$$\Delta S_{\Sigma} = \Delta S_T + \sum_{s=1}^S T_s \Delta q_s + \sum_{v=1}^V T_v \Delta q_v \quad (*)$$

$$\Delta S_{\Sigma} = \Delta S_T + \sum_{i=1}^N T_i \Delta q_i$$

$\Delta S_T$  – теоретическая составляющая суммарной погрешности

$\sum^S$  – скалярные погрешности

$\sum^V$  – векторные погрешности

Сделаем следующие допущения:

1. Все первичные погрешности являются случайными величинами, и значение каждой из них не зависит от значений остальных.
2. Для каждой первичной погрешности мы знаем все ее числовые характеристики:  $\Delta q, \Delta q_s, \delta, \sigma, \lambda$ .
3. Коэффициент влияния векторного первичной погрешности является величиной случайной, независимой от векторной погрешности. Для каждого из этих коэффициентов влияния мы имеем  $T_V, \Delta_{\alpha_{iV}}, \delta_{iV}, \sigma_{iV}, \lambda_{iV}$ .
4. Значения суммируемых конечных погрешностей являются величинами одного порядка, т.е. максимальные значения любых двух конечных погрешностей отличаются друг от друга не более чем на один порядок, т.е. значения примерно равнозначны.
5. Число суммируемых конечных погрешностей достаточно велико, чтобы для целей практики его можно было бы считать бесконечно большим.

Закон распределения суммарной погрешности будет нормальным, что следует из первого и двух последних предположений.

Рассмотрим еще раз формулу (\*) для определения суммарной погрешности.

1. Считаем, что функция теоретической погрешности линейна. Теоретическая погрешность будет рассматриваться как неслучайная величина. Разделим входящие в формулу величины на случайные и неслучайные.

$\Delta S_T, T_i$  – неслучайные величины

$\Delta q_s, \Delta q_V, T_V$  – случайные величины

Суммарная погрешность представляет собой случайную величину сложной структуры

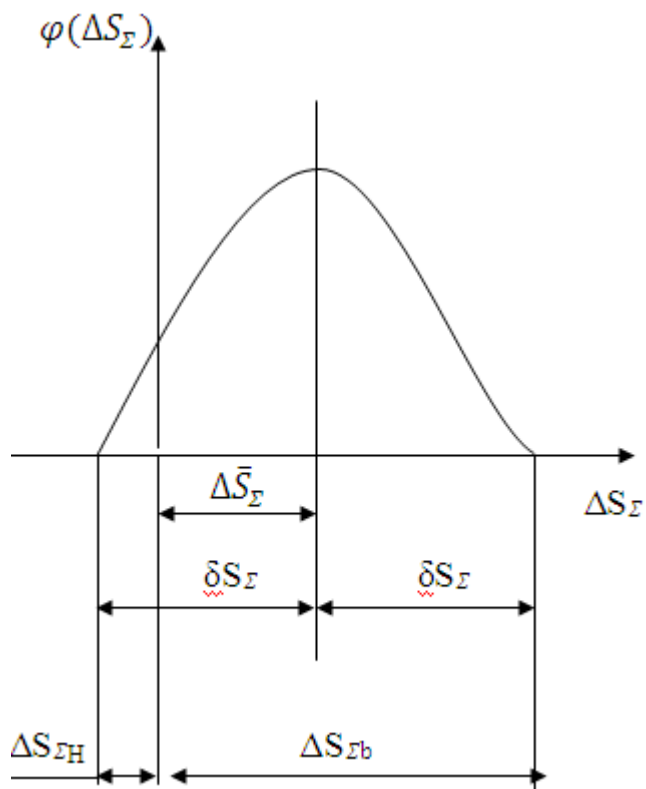
$$\Delta S_Z = \Delta \bar{S}_Z + \delta S_Z$$

$\Delta \bar{S}_Z$  – среднее значение суммарной погрешности (систематическая составляющая).

$\delta S_Z$  – практически предельная случайная составляющая суммарной погрешности.

$$\delta S_Z = z \sigma [\Delta S_Z]$$

Z- величина, зависящая от процента риска. Процент риска - вероятность получения из годных деталей приборов, имеющих суммарную погрешность, выходящую за расчетные пределы. Найденное таким образом значение суммарной погрешности называется практически предельным полным. Для нахождения пределов для полной погрешности нужно к среднему значению погрешности положения прибавить (отнять) предельную случайную погрешность положения.



Предельные значения определяются соответственно:

$$\Delta S_{\Sigma \text{в}} = \Delta \bar{S}_{\Sigma} + \delta S_{\Sigma}$$

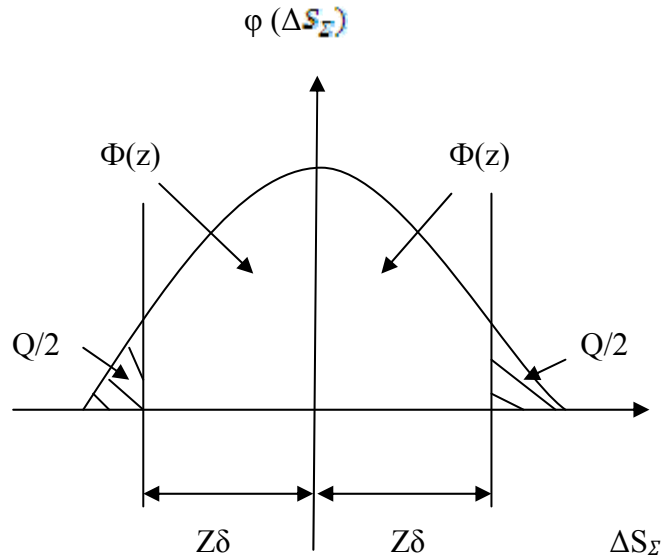
$$\Delta S_{\Sigma \text{н}} = \Delta \bar{S}_{\Sigma} - \delta S_{\Sigma}$$

Полученные формулы для определения предельных значений погрешности положения группы механизмов отвечают следующим исходным условиям:

- 1) Все учитываемые первичные погрешности взаимно независимы.
- 2) Количество учитываемых погрешностей и их распределение таковы, что закон распределения суммарной погрешности может быть принят нормальным.
- 3) При определении коэффициента влияния учитываются направление выборки зазоров и изменение этих направлений при реверсировании.
- 4) Погрешности положения механизма являются линейными функциями первичных погрешностей.



Существенное значение при расчёте точности механизма имеет выбор величины  $z$ .



Теоретическая зона рассеивания случайной величины, подчиняющейся нормальному закону распределения, бесконечна, но вероятность получения весьма больших отклонений очень мала. Можно ограничиться практической зоной рассеивания случайной величины, отбрасывая значения с ничтожно малой вероятностью появления. Чем больше значение  $z$ , т.е. взята большая зона рассеивания, тем меньше вероятность получения отклонений, выходящих за эту зону. Вероятность этих отклонений, не принимаемых при расчёте, называется процентом риска ( $Q$ ) и для нормального закона распределения  $Q = 1 - 2\Phi(z)$ , что соответствует сумме двух заштрихованных площадей. Величина  $2\Phi(z)$  может быть названа надёжностью расчёта и характеризует вероятность выхода расчётных значений за одну из границ принятой практической зоны рассеивания.

При расчёте точности механизма прибора часто  $z$  принимают равным 3, т.е. считают ничтожно малой вероятностью выхода случайных погрешностей за каждую из расчётных границ. При этом  $Q/2=0,13\%$ . В тех случаях, когда при расчёте предельной погрешности прибора расчётное значение её оказывается больше допустимого, можно уменьшить расчётную погрешность механизма. Приняв меньшее значение для  $z$  ( $z=2$  вместо 3). Такое уменьшение величины  $z$  вызывает увеличение процента риска  $Q$ . Подобное повышение при расчёте процента риска может быть допущено, если появление после сборки приборов с погрешностью, превышающей расчётную, может быть обнаружена при их приёмке и не вызывает чрезмерных затруднений при переборке этих приборов. Таким образом, выбор значения  $z$  позволяет уменьшить расчётную погрешность положения механизма, увеличивая количество экземпляров приборов, не укладывающихся в расчётные нормы.

$$\Delta S_{\Sigma} = \Delta S_T + \sum_{S} T_S \Delta \bar{q}_S + \sum_{V} T_V \Delta \bar{q}_V$$

$$\bar{T}_V = \Delta_{\text{отв}} + \alpha_{\text{отв}} \delta_{\text{отв}}$$

$$\Delta \bar{q}_S = \Delta_{0S} + \alpha_S \delta_S$$

$$\Delta \bar{q}_v = \Delta_{qv} + \alpha_v \delta_v$$

$$\Delta S_{\Sigma} = \Delta S_T + \sum^S T_S \Delta \bar{q}_S + \sum^V T_V \Delta \bar{q}_V = \Delta S_T + \sum T_S (\Delta_{qS} + \alpha_S \delta_S) + \sum (\Delta_{qv} + \alpha_{tv} \delta_{tv}) = (\Delta_{qv} + \alpha_v)$$

Найдя среднее квадратическое отклонение этой величины, определим второе слагаемое из формулы  $\Delta S_{\Sigma} = \Delta \bar{S}_{\Sigma} \pm \delta S_{\Sigma}$

$$\delta S_{\Sigma} = \sqrt{\sum^S T_S^2 \lambda_S^2 + \delta_S^2 + \sum^V \{ \lambda_{tv}^2 \delta_{tv}^2 [\lambda_{qv}^2 \delta_{qv}^2 + (\Delta_{qv} + \alpha_v \delta_v)^2] + T_V^2 \lambda_{qv}^2 \delta_{qv}^2 \}}$$

### 18.1 Способы уменьшения ожидаемой погрешности

Суммарная погрешность зависит от допусков параметров, следовательно, 1-й способ заключается в ужесточении допусков параметров, однако этот способ очень дорог.

2-й способ: уменьшение величины z, т.е. повышение процента риска. Недостатком данного способа является то, что он приводит к удорожанию всей продукции из-за увеличения плана её выпуска.

Недостатки обоих способов:

1. Невозможность воздействия на систематическую составляющую суммарной погрешности

2. Удорожание

3-й способ: компенсация конечных погрешностей.

Мы отказываемся от полной взаимозаменяемости. В цепь вводятся специальные устройства, называемые компенсаторами, которые позволяют либо непосредственно воздействовать на тот или иной параметр, либо воздействовать на коэффициент влияния, в результате чего уменьшается значение конечных погрешностей.

Недостатки способа:

1. Необходимость регулировки.

2. Необходимость усложнения структуры прибора.

### 18.2 Последовательность расчёта точности партии однородных измерительных устройств

1. Для выбранной схемы прибора определяют погрешности схемы.

2. Выделяют основные устройства и определяют их частные погрешности.

3. Для каждой первичной погрешности находят числовые характеристики, связанные с полем допуска:  $\lambda, \alpha, \Delta_{qv}, \delta$ .

4. Вычисляют коэффициент влияния для каждой погрешности. Если коэффициент влияния имеет случайный характер, то для него находят статистические характеристики  $T_{V1}, \alpha_{tv}, \lambda_{tv}, \delta_{tv}$ , а также нормируемую корреляционную функцию.  $r(T_{V1}, T_{V2})$ .

5. Составляют сводную таблицу расчётных данных для определения результирующей погрешности прибора.

6. По данным таблицы определяют статистические характеристики прибора, например, положения механизма в нескольких положениях ведущего звена при выбранном проценте риска.

7. Для приборов, предназначенных для абсолютных измерений, строят графики значений средних и предельных погрешностей положений механизма в зависимости от положений ведущего звена.

8. Для приборов, применяемых для дифференциальных измерений, определяют статистические характеристики погрешности перемещения механизма в нескольких положениях ведущего звена при выбранном проценте риска.

## **19. Компенсация погрешностей механизмов**

### **19.1 Виды конечных погрешностей механизма**

Компенсаторами называют специально вводимые в механизм регулировочные устройства, воздействующие на тот или иной его параметр (или же нулевой параметр) для уменьшения его погрешности положения или же перемещения.

Процесс введения величин с помощью компенсатора носит название регулирование механизма. Компенсаторы повышают технологичность конструкции, позволяя расширять допуски на изготовление её элементов при сохранении заданной точности прибора.

Настройка компенсаторов и регулирование механизма выполняются после его изготовления, следовательно, большинство первичных погрешностей, случайных по характеру их возникновения, проявляются в виде систематических ошибок, и только небольшая их часть, относящаяся к нулевым параметрам механизма, а также предельные погрешности эксплуатационного характера, сохраняют неустойчивый случайный характер.

Таким образом, конечные погрешности с точки зрения выбора компенсаторов и системы регулирования механизмов целесообразно делить следующим образом:

#### **1. Конечные погрешности систематического характера.**

1.1. Одинаковые по величине или закону их изменения в функции от положения ведущего звена не только для единичного механизма, но и для всех механизмов данного типа.

1.2. Повторяющиеся при многократных действиях каждого конкретного экземпляра механизма, но различны для различных отдельных экземпляров.

2. Конечные случайные погрешности, т.е. такие погрешности, величина или закон изменения которых не повторяются не только в различных экземплярах данного типа, но и при повторных действиях каждого конкретного экземпляра.

Конечные погрешности первой группы представляют собой непрерывные функции перемещения ведущего звена. Действие таких погрешностей проявляется по всей шкале прибора, в каждой её точке. Главную часть конечных погрешностей, входящих в эту

группу, составляют конечные погрешности в некоторых звеньях, которые практически сохраняют своё постоянство в течение всего периода работы механизма.

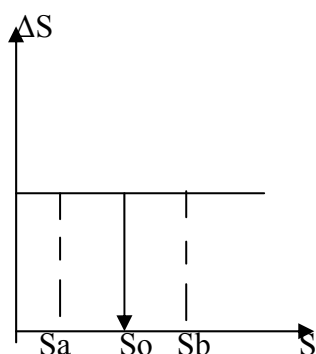
Конечные погрешности подгруппы 1.1. могут быть уменьшены или вовсе устранены либо путём исправления конструкции, чертежа, размера, либо путём введения в эту конструкцию такого компенсаторного устройства, которое компенсирует как постоянные погрешности (во всех экземплярах механизма), так и погрешности, возникающие в связи с изменением условий эксплуатации механизма. Конечные погрешности подгруппы 1.2. могут быть достаточно полно скомпенсированы, но здесь требуется индивидуальная регулировка каждого конкретного экземпляра механизма.

Конечные погрешности 2-ой группы наиболее многочисленны. К ним относятся, главным образом, конечные погрешности, возникающие от первичных погрешностей в нулевых параметрах, но они возникают также и за счёт местных искажений. Они влияют на нестабильность показаний и, как правило, нормируются в приборах наряду с допустимой погрешностью в весьма жёстких пределах. Предупреждение погрешностей этого рода достигается конструктивными средствами, например, такими, как:

1. Упругая компенсация мёртвых ходов и зазоров.
2. Искусственное увеличение нагрузок для уменьшения относительного изменения их в действующем объекте.
3. Введение демпфирования.
4. Изменение собственных частот колебаний системы и вывод её из режима автоколебаний или резонанса.

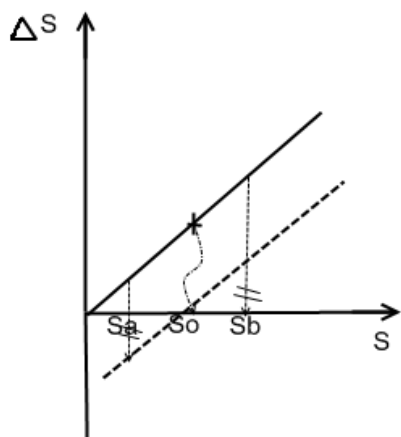
## 19.2 Классификация погрешностей по закономерности их изменения и по способам регулировки

### 19.2.1 Погрешности постоянные (аддитивные)



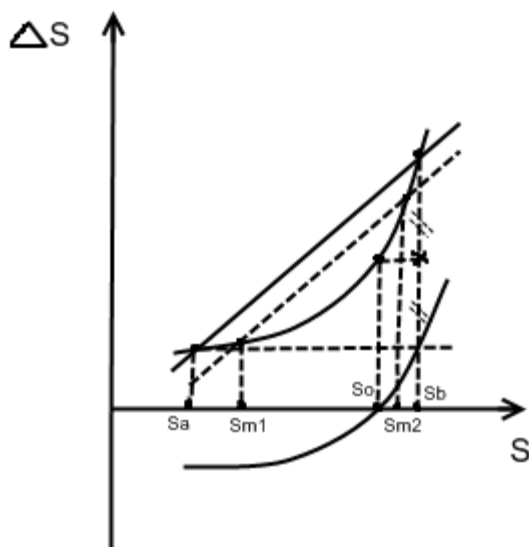
Так выглядит погрешность начального положения в рычажных механизмах, которая приводит к несимметричности градуировочной характеристики. Погрешность может быть скомпенсирована, для этого вводится постоянный компенсатор. Система регулировки заключается в следующем: с помощью измерительного устройства измеряем любое значение  $S_o$  в пределе от  $S_a$  до  $S_b$ . Это значение точно соответствует тому, которое необходимо знать в соответствии с градуировочной характеристикой.

### 19.2.2 Прогрессивные (мультипликативные)



К таким погрешностям относятся все погрешности масштабов, погрешности, вызванные отклонением длин рычагов, отклонения значений электрических сопротивлений. Частичная компенсация погрешности производится введением постоянного компенсатора. Опустив прямую, необходимо сделать ее симметричной относительно оси абсцисс, чем мы максимально уменьшаем значение погрешности по модулю. Для полной компенсации вводится масштабный компенсатор, который в состоянии уменьшить передаточное отношение. Например: изменение длины рычага в аналитических весах. Такой компенсатор позволяет регулировать длины плеч весов. Регулировка осуществляется в двух точках (можно брать 2 любые точки).

### 19.2.3 Нелинейные



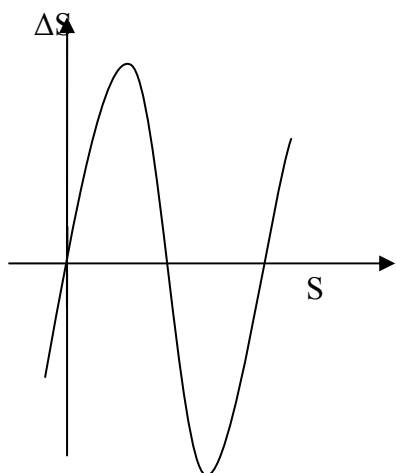
Под нелинейной погрешностью понимается погрешность монотонно убывающая или возрастающая, но изменяющаяся нелинейно. Она частично может быть скомпенсирована введением постоянного компенсатора. Отыскиваем  $S_o$ , для чего делим максимальную ординату пополам, поэтому метод называется половинения погрешности. На практике

вводят компенсатор и определяют погрешности по краям шкалы. Когда они становятся равными по краям шкалы и противоположными по знаку, регулировку прекращают.

$S_{m1}$ ,  $S_{m2}$ - определяют аппроксимирующую прямую

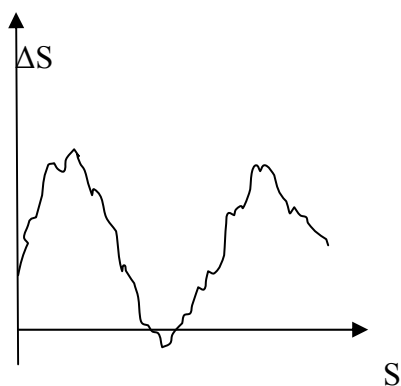
$S_a = S_{m1}$ ,  $S_b = S_{m2}$ , т.е. вводят масштабный компенсатор так, чтобы по краям шкалы погрешности были нулевые. Для полной компенсации должен вводиться и третий компенсатор, но на практике обычно обходятся двумя, т.е. компенсация частичная.

#### 19.2.4 Погрешности периодические



Так, например, выглядит кинематическая погрешность зубчатых колес. Такие погрешности компенсируются крайне сложно. Для частичной компенсации таких погрешностей необходимо вводить 4 компенсатора, чего на практике никогда не делают. Для борьбы с такими погрешностями вводят искусственные эксцентриситеты зубчатых колес. Для уменьшения конечной суммарной погрешности зубчатые передачи ставят в конце кинематической цепочки, ввиду трудности компенсации.

#### 19.2.5 Аперiodические



Так обычно выглядит суммарная конечная погрешность. Такую погрешность необходимо представить приближенно в виде многочлена некоторой степени, и в зависимости от вида многочлена вводят соответствующий компенсатор.

В заключение отметим, что первичных погрешностей вовсе некомпенсируемых в механизме нет, т.к. компенсаторами являются те же параметры механизма, которые служат источниками первичных погрешностей, а именно: размеры, начальные размеры, начальные положения. Речь может идти лишь о простоте компенсации и ее полноте, что связано с соответствием действия компенсатора той конечной погрешности, которую устраняют.

### **Основная литература**

1. Коротков В.П., Тайц Б.А. Основы метрологии и теории точности измерительных устройств. –М.:Изд-во стандартов, 1988.
2. Грейм И.А. Элементы проектирования и расчет элементов приборов. –Л.: Машиностроение, 1972.
3. Рудзит Я.А., Плуталов В.И. Основы метрологии, точность и надежность в приборостроении. –М.: Машиностроение, 1991.

### **Дополнительная литература**

1. Кемпинский М.М. Точность и надежность измерительных приборов. –Л.: Машиностроение, 1972.
2. Иванцов А.И. Основы теории точности измерительных устройств. –М.: Издательство стандартов, 1972.