

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**В.Ф. Скворцов**

## **ОСНОВЫ РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИЙ ИЗДЕЛИЙ**

*Допущено УМО вузов  
по университетскому политехническому образованию  
в качестве учебного пособия для студентов,  
обучающихся по направлению подготовки 150700 «Машиностроение»*

Издательство  
Томского политехнического университета  
2012

УДК 621.753.1(075.8)  
ББК 34.44я73  
С42

**Скворцов В.Ф.**

С42 Основы размерного анализа конструкций изделий: учебное пособие / В.Ф. Скворцов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 80 с.

ISBN 978-5-4387-0133-0

В пособии изложены основы размерного анализа конструкций изделий, рассмотрены соответствующие примеры, приведены контрольные вопросы и задачи.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению магистерской подготовки 150700 «Машиностроение».

**УДК 621.753.1(075.8)**  
**ББК 34.44я73**

*Рецензенты*

Доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой  
«строительные и дорожные машины» ТГАСУ  
*В.Г. Ананин*

Доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой механики и графики ТУСУРа  
*Б.А. Люшкин*

ISBN 978-5-4387-0133-0

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2012  
© Скворцов В.Ф., 2012  
© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2012

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ .....	5
1.1. Основные понятия и определения .....	5
1.2. Основные уравнения .....	9
1.3. О выявлении размерных цепей .....	15
Контрольные вопросы .....	18
2. МЕТОДЫ ДОСТИЖЕНИЯ ТОЧНОСТИ ЗАМЫКАЮЩИХ ЗВЕНЬЕВ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ .....	19
2.1. Метод полной взаимозаменяемости .....	19
2.2. Метод неполной взаимозаменяемости .....	22
2.3. Метод групповой взаимозаменяемости .....	24
2.4. Метод пригонки .....	30
2.5. Метод регулировки .....	34
Контрольные вопросы .....	41
3. РАСЧЕТ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ СО ЗВЕНЬЯМИ В ВИДЕ ОТКЛОНЕНИЙ РАСПОЛОЖЕНИЯ .....	42
3.1. Расчет подетальных размерных цепей .....	42
3.2. Расчет сборочной размерной цепи .....	48
Контрольные вопросы .....	52
4. ПРИМЕРЫ РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИЙ ИЗДЕЛИЙ .....	53
4.1. Обеспечение точности положения сборочных единиц изделия .....	53
4.2. Обеспечение точности положения деталей в сборочной единице .....	57
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	60
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	61
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	65
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....	70

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка конструкции изделия (машины) всегда предполагает установление требований к его точности в целом, а также к точности всех составных частей. Последнюю задачу грамотно можно решить только на основе размерного анализа конструкции изделия. В связи с этим студенты, обучающиеся по направлению магистерской подготовки 150700 «Машиностроение», должны знать основы этого анализа и уметь его использовать на практике.

Под размерным анализом конструкции изделий обычно понимается выявление замыкающих звеньев и построение схем размерных цепей, выбор методов достижения точности замыкающих звеньев и собственно расчет размерных цепей.

Вопросы размерного анализа рассматриваются во многих изданиях [1–9]. Однако большинство из них является монографиями, которые сложны для восприятия студентами.

В предлагаемом учебном пособии в сжатой форме систематически изложены основы размерного анализа конструкций изделий.

В первом разделе приведены основные понятия и определения теории размерных цепей, даны выводы основных уравнений, а также изложена процедура выявления размерных цепей.

Во втором разделе рассмотрены методы достижения точности замыкающих звеньев размерных цепей: полной, неполной и групповой взаимозаменяемости, пригонки и регулировки. Отмечены достоинства и недостатки этих методов, указаны рациональные области применения.

Третий раздел посвящен особенностям построения и расчета размерных цепей, звеньями которых являются отклонения расположения поверхностей (осей).

В четвертом разделе даны примеры размерного анализа конструкций изделий.

В приложении приведены справочные данные, необходимые для размерного анализа конструкций изделий, а также помещены задачи для закрепления теоретического материала.

Учебное пособие предназначено для студентов указанного выше направления, изучающих дисциплину «Размерный анализ конструкций изделий». Оно также может быть использовано ими при выполнении выпускных квалификационных работ.

# 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ

## 1.1. Основные понятия и определения

*Размерной цепью* называется совокупность размеров, непосредственно участвующих в решении поставленной задачи и образующих замкнутый контур.

Например, совокупность размеров  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_\Delta$  (рис. 1.1, а) образуют размерную цепь, которая определяет величину зазора  $A_\Delta$ .

Размерные цепи принято изображать в виде отдельных схем (рис. 1.1, б, г).

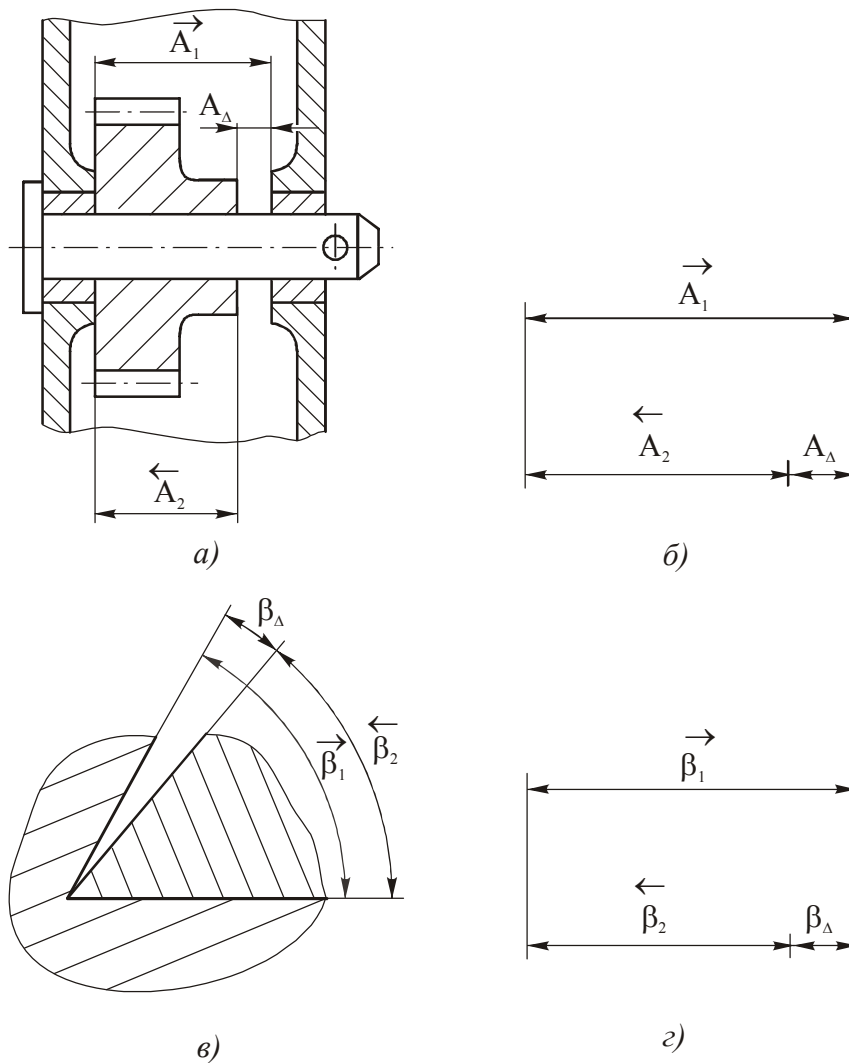


Рис. 1.1. Конструкторские размерные цепи

Размеры, образующие размерную цепь, называются *звеньями* размерной цепи.

Звеньями размерных цепей могут быть как линейные (рис. 1.1, а), так и угловые размеры (рис. 1.1, в).

Звенья – линейные размеры – принято обозначать прописными буквами русского алфавита (А, Б, ...), а звенья – угловые размеры – строчными буквами греческого алфавита ( $\beta$ ,  $\gamma$ , ...), за исключением букв  $\alpha$ ,  $\delta$ ,  $\xi$ ,  $\lambda$ ,  $\omega$ . В отдельных случаях могут быть использованы и другие обозначения.

В любой размерной цепи одно из звеньев является замыкающим, а остальные – составляющими звеньями.

*Замыкающим* называют звено размерной цепи, являющееся исходным при постановке задачи или получающееся последним в результате ее решения.

Например, очевидно, что именно исходя из требуемого значения зазора  $A_{\Delta}$  (рис. 1.1, а) следует определять значения звеньев  $A_1$  и  $A_2$ . Поэтому звено  $A_{\Delta}$  в рассматриваемой размерной цепи является замыкающим. Очевидно также, что это звено при сборке механизма будет получено последним. То же самое можно сказать о звене  $\beta_{\Delta}$ , рассматривая размерную цепь, показанную на рис. 1.1, в.

Замыкающее звено обозначается индексом  $\Delta$ .

Составляющие звенья размерной цепи делятся на увеличивающие и уменьшающие.

*Увеличивающим* звеном называют такое, с увеличением которого замыкающее звено увеличивается.

*Уменьшающим* звеном называют такое, с увеличением которого замыкающее звено уменьшается.

В размерной цепи, показанной на рис. 1.1, а, звено  $A_1$  – увеличивающее, а звено  $A_2$  – уменьшающее.

Увеличивающие звенья обозначаются стрелкой над буквой, направленной вправо ( $\vec{A}_1$ ), а уменьшающие – стрелкой, направленной влево ( $\overleftarrow{A}_2$ ).

Задача выделения увеличивающих и уменьшающих звеньев для коротких размерных цепей оказывается достаточно простой. С увеличением числа звеньев в размерной цепи эта задача усложняется и для облегчения ее решения целесообразно использовать следующий прием. Замыкающему звену условно присваивают индекс уменьшающего, т. е. стрелка над его буквой направляется влево (рис. 1.2). Затем проводится мысленный обход размерного контура по этой стрелке, в направ-

лении обхода расставляются стрелки над буквами, обозначающими составляющие звенья. Если стрелка будет направлена вправо – звено увеличивающее, а если влево – уменьшающее.

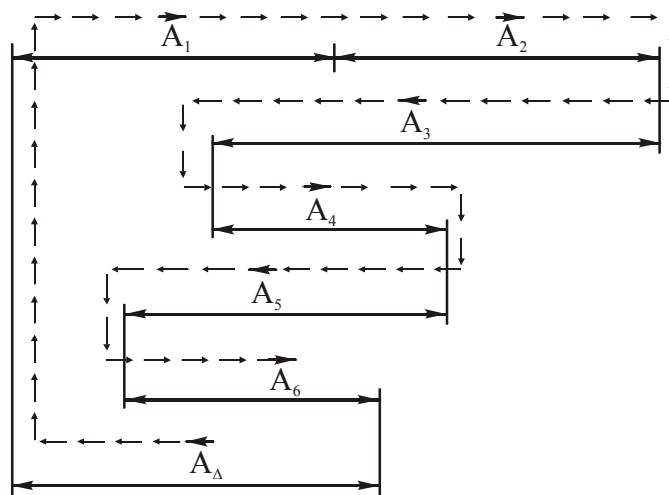


Рис. 1.2. Схема размерной цепи.

Линией со стрелками показана последовательность «обхода» размерного контура для выделения увеличивающих и уменьшающих звеньев

Размерные цепи по назначению делятся на *конструкторские, технологические и измерительные*. Первые используют на этапе конструирования изделий, вторые – на этапе их изготовления, третьи – при измерении деталей.

Конструкторские размерные цепи делят на сборочные и поддетальные. Примерами сборочных размерных цепей являются цепи, показанные на рис. 1.1. Пример поддетальной размерной цепи приведен на рис. 1.3. Здесь  $A_1$  и  $A_2$  – составляющие звенья (их значения указывают на чертеже детали);  $A_{\Delta}$  – замыкающее звено (его значение на чертеже не приводят).

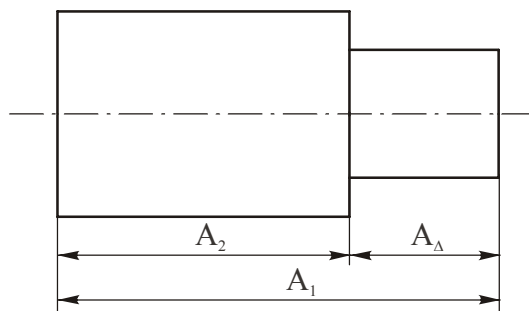


Рис. 1.3. Поддетальная размерная цепь

Звенья размерной цепи могут располагаться в одной или нескольких параллельных плоскостях и в непараллельных плоскостях. В первом случае размерную цепь называют *плоской*, во втором – *пространствен-*

ной. Причем в плоских размерных цепях звенья могут быть как параллельны, так и не параллельны друг другу. На рис. 1.4 показана плоская размерная цепь, составляющее звено  $A_3$  которой расположено под углом  $\alpha$  к направлению замыкающего звена. Такое звено включается в размерную цепь своей проекцией ( $A'_3$ ) на это направление. Причем угол  $\alpha$  считается постоянным и  $A'_3 = A_3 \cos \alpha$ . Предположим, что звено  $A_3 = 100^{+0,6}_{-0,2}$ , а угол  $\alpha = 30^\circ$ . Номинальное значение этого звена составит:

$$A'_3 = A_3 \cos \alpha = A_3 \cos 30^\circ = 100 \cdot 0,866 = 86,6 \text{ (мм)}.$$

Предельные отклонения звена  $A'_3$ :

$$\Delta_B A'_3 = \Delta_B A_3 \cdot \cos \alpha = \Delta_B A_3 \cdot \cos 30^\circ = 0,6 \cdot 0,866 = 0,52 \text{ (мм)};$$

$$\Delta_H A'_3 = \Delta_H A_3 \cdot \cos \alpha = \Delta_H A_3 \cdot \cos 30^\circ = -0,2 \cdot 0,866 = -0,17 \text{ (мм)}.$$

Следовательно,  $A'_3 = 86,6^{+0,52}_{-0,17}$  мм.

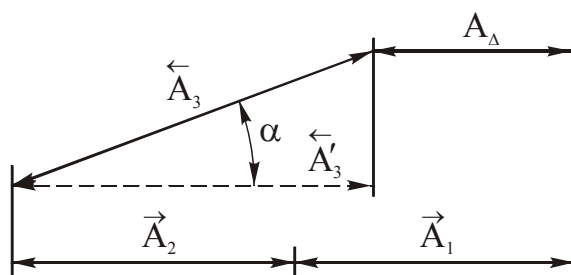


Рис. 1.4. Плоская размерная цепь с непараллельными звеньями

Таким образом любая плоская размерная цепь с непараллельными звеньями может быть сведена к плоской размерной цепи с параллельными звеньями.

Отдельные размерные цепи могут быть связаны между собой. *Параллельно-связанными* называют размерные цепи, имеющие одно или несколько общих составляющих звеньев. *Последовательно-связанными* называют размерные цепи, из которых каждая последующая имеет общую базу с предыдущей. Размерные цепи с комбинированной связью имеют между собой как параллельные, так и последовательные связи. Примеры размерных цепей с различными связями приведены на рис. 1.5. Видно (рис. 1.5, а), что у размерных цепей А ( $A_1, A_2, A_3, A_\Delta$ ) и Б ( $B_1, B_2, B_3, B_\Delta$ ) имеется два общих составляющих звена –  $A_3 = B_2$  и  $A_2 = B_3$ . У размерных цепей А и В (рис. 1.5, б) есть общая база. У размерных цепей А, Б и В, показанных на рис. 1.5, в, имеются как параллельные, так и последовательные связи.



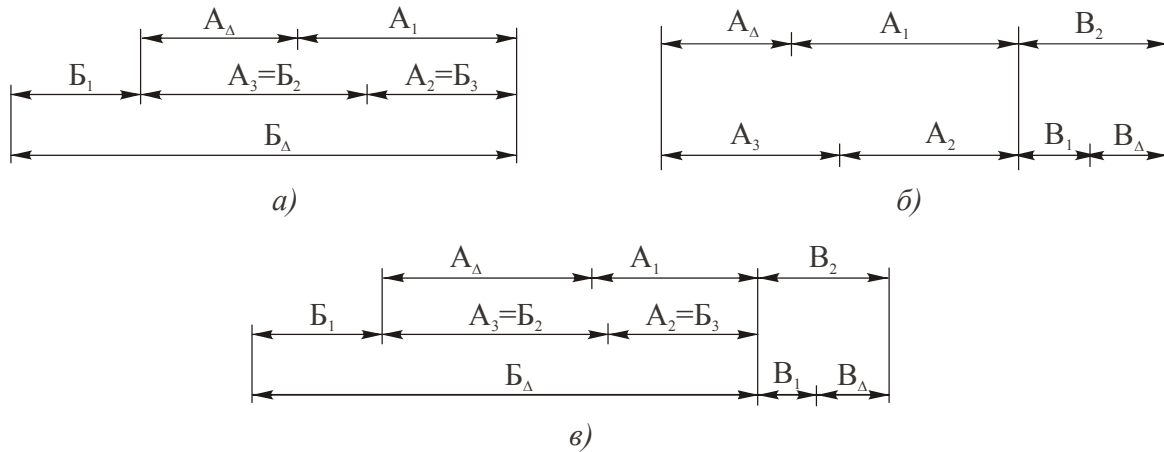


Рис. 1.5. Три вида связей размерных цепей:  
*a* – параллельный; *б* – последовательный; *в* – параллельно-последовательный

## 1.2. Основные уравнения

Найдем зависимости между основными параметрами замыкающего звена и составляющих звеньев плоской размерной цепи с параллельными звеньями. Для этого сначала обратимся к рис. 1.1, *a*.

Очевидно, что номинальное значение замыкающего звена  $A_{\Delta}$  составит

$$A_{\Delta} = \bar{A}_1 - \bar{A}_2.$$

В общем случае при  $n$  увеличивающих и  $p$  уменьшающих звеньев в размерной цепи получим

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n \bar{A}_i - \sum_{i=1}^p \bar{A}_i. \quad (1.1)$$

Это уравнение принято называть уравнением размерной цепи или уравнением номиналов.

Используя понятие передаточного отношения  $\xi_i$ , которое равно +1 для увеличивающих и -1 для уменьшающих звеньев, уравнение размерной цепи можно записать в более компактной форме:

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{n+p} \xi_i A_i. \quad (1.2)$$

Очевидно (рис. 1.1, *a*), что наибольшее и наименьшее предельные значения замыкающего звена  $A_{\Delta}$  выразятся через предельные значения составляющих звеньев  $\bar{A}_1$  и  $\bar{A}_2$  следующим образом:

$$A_{\Delta_{\text{нб}}} = \bar{A}_{1_{\text{нб}}} - \bar{A}_{2_{\text{нм}}};$$

$$A_{\Delta_{\text{нм}}} = \bar{A}_{1_{\text{нм}}} - \bar{A}_{2_{\text{нб}}}.$$

В общем случае

$$A_{\Delta_{\text{нб}}} = \sum_{i=1}^n \bar{A}_{i_{\text{нб}}} - \sum_{i=1}^p \bar{A}_{i_{\text{нм}}}; \quad (1.3)$$

$$A_{\Delta_{\text{нм}}} = \sum_{i=1}^n \bar{A}_{i_{\text{нм}}} - \sum_{i=1}^p \bar{A}_{i_{\text{нб}}}. \quad (1.4)$$

Для установления зависимости между допуском замыкающего звена и допусками составляющих звеньев размерной цепи вычтем почленно из уравнения (1.3) уравнение (1.4). При этом получим

$$TA_{\Delta} = \sum_{i=1}^n T\bar{A}_i + \sum_{i=1}^p T\bar{A}_i$$

или окончательно

$$TA_{\Delta} = \sum_{i=1}^{n+p} TA_i, \quad (1.5)$$

то есть *допуск замыкающего звена равен сумме допусков составляющих звеньев.*

Найдем зависимости между предельными отклонениями замыкающего звена и составляющих звеньев размерной цепи. Из схемы, приведенной на рис. 1.6, следует, что наибольшее и наименьшее предельные значения составляющих звеньев и замыкающего звена могут быть записаны в виде

$$A_{i_{\text{нб}}} = A_i + \Delta_{\text{в}} A_i; \quad (1.6)$$

$$A_{i_{\text{нм}}} = A_i + \Delta_{\text{н}} A_i; \quad (1.7)$$

$$A_{\Delta_{\text{нб}}} = A_{\Delta} + \Delta_{\text{в}} A_{\Delta}; \quad (1.8)$$

$$A_{\Delta_{\text{нм}}} = A_{\Delta} + \Delta_{\text{н}} A_{\Delta}. \quad (1.9)$$

В выражениях (1.6–1.9)  $\Delta_{\text{в}} A_i$ ,  $\Delta_{\text{в}} A_{\Delta}$  – верхние отклонения составляющих звеньев и замыкающего звена;  $\Delta_{\text{н}} A_i$ ,  $\Delta_{\text{н}} A_{\Delta}$  – их нижние отклонения. Подставляя эти выражения в уравнения (1.3) и (1.4), будем иметь:

$$A_{\Delta} + \Delta_B A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n (\bar{A}_i + \Delta_B \bar{A}_i) - \sum_{i=1}^p (\bar{A}_i + \Delta_H \bar{A}_i);$$

$$A_{\Delta} + \Delta_H A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n (\bar{A}_i + \Delta_H \bar{A}_i) - \sum_{i=1}^p (\bar{A}_i + \Delta_B \bar{A}_i).$$

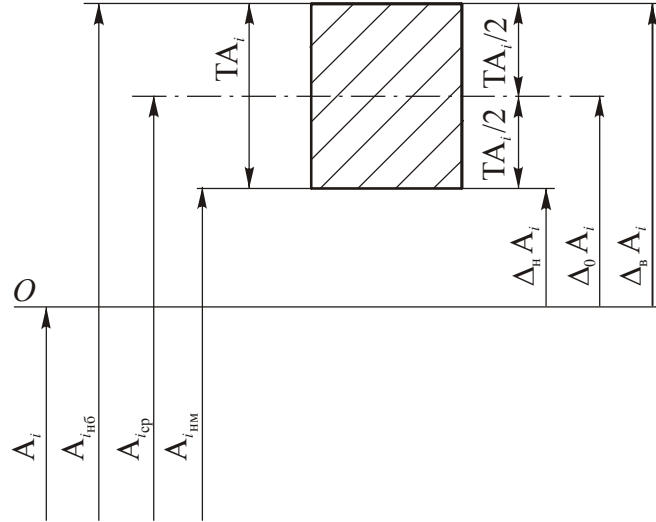


Рис. 1.6. Схема размеров, допуска и отклонений

Вычитая почленно из этих уравнений уравнение (1.1), получим:

$$\Delta_B A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n \Delta_B \bar{A}_i - \sum_{i=1}^p \Delta_H \bar{A}_i; \quad (1.10)$$

$$\Delta_H A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n \Delta_H \bar{A}_i - \sum_{i=1}^p \Delta_B \bar{A}_i. \quad (1.11)$$

Таким образом, *верхнее отклонение замыкающего звена равно разности сумм верхних отклонений увеличивающих звеньев и нижних отклонений уменьшающих звеньев, а нижнее отклонение замыкающего звена равно разности сумм нижних отклонений увеличивающих звеньев и верхних отклонений уменьшающих звеньев.*

Установим зависимость между координатой середины поля допуска замыкающего звена ( $\Delta_0 A_{\Delta}$ ) и координатами середин полей допусков составляющих звеньев ( $\Delta_0 A_i$ ). Для этого в соответствии со схемой (рис. 1.6) выразим предельные отклонения замыкающего звена и составляющих звеньев через координату середины поля допуска и допуск

$$\Delta_B A_{\Delta} = \Delta_0 A_{\Delta} + \frac{T A_{\Delta}}{2}; \quad (1.12)$$

$$\Delta_{\text{H}}A_{\Delta} = \Delta_0A_{\Delta} - \frac{\text{T}A_{\Delta}}{2}; \quad (1.13)$$

$$\Delta_{\text{B}}A_i = \Delta_0A_i + \frac{\text{T}A_i}{2}; \quad (1.14)$$

$$\Delta_{\text{H}}A_i = \Delta_0A_i - \frac{\text{T}A_i}{2}. \quad (1.15)$$

Подставляя эти выражения в уравнения (1.10) и (1.11), имеем:

$$\begin{aligned} \Delta_0A_{\Delta} + \frac{\text{T}A_{\Delta}}{2} &= \sum_{i=1}^n \left( \Delta_0\bar{A}_i + \frac{\text{T}\bar{A}_i}{2} \right) - \sum_{i=1}^p \left( \Delta_0\bar{A}_i - \frac{\text{T}\bar{A}_i}{2} \right); \\ \Delta_0A_{\Delta} - \frac{\text{T}A_{\Delta}}{2} &= \sum_{i=1}^n \left( \Delta_0\bar{A}_i - \frac{\text{T}\bar{A}_i}{2} \right) - \sum_{i=1}^p \left( \Delta_0\bar{A}_i + \frac{\text{T}\bar{A}_i}{2} \right). \end{aligned}$$

Сложив почленно эти уравнения и разделив левую и правую части полученного в результате этого равенства на 2, получим следующую зависимость:

$$\Delta_0A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n \Delta_0\bar{A}_i - \sum_{i=1}^p \Delta_0\bar{A}_i, \quad (1.16)$$

*т. е. координата середины поля допуска замыкающего звена равна разности сумм координат середин полей допусков увеличивающих и уменьшающих звеньев.*

Если ввести передаточные отношения, то уравнение (1.16) примет вид

$$\Delta_0A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{n+p} \xi_i \Delta_0A_i. \quad (1.17)$$

Выразим среднее значение замыкающего звена ( $A_{\Delta_{\text{cp}}}$ ) через средние значения составляющих звеньев ( $A_{i_{\text{cp}}}$ ). Для этого сложим почленно уравнение (1.16) и уравнение (1.1). В результате получим

$$\Delta_0A_{\Delta} + A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n (\Delta_0\bar{A}_i + \bar{A}_i) - \sum_{i=1}^p (\Delta_0\bar{A}_i + \bar{A}_i).$$

Учитывая, что (см. рис. 1.3)

$$\Delta_0A_{\Delta} + A_{\Delta} = A_{\Delta_{\text{cp}}};$$

$$\Delta_0A_i + A_i = A_{i_{\text{cp}}},$$

будем иметь

$$A_{\Delta_{cp}} = \sum_{i=1}^n \vec{A}_{i_{cp}} - \sum_{i=1}^p \bar{A}_{i_{cp}}, \quad (1.18)$$

т. е. *среднее значение замыкающего звена равно разности сумм средних значений увеличивающих и уменьшающих звеньев.*

Используя передаточные отношения, уравнение (1.18) можно записать в виде

$$A_{\Delta_{cp}} = \sum_{i=1}^n \vec{A}_{i_{cp}} - \sum_{i=1}^p \bar{A}_{i_{cp}} \quad (1.19)$$

Зависимости (1.3–1.5) и (1.10–1.11) получены в предположении, что в размерной цепи возможно одновременное сочетание наибольших увеличивающих и наименьших уменьшающих звеньев или их обратное сочетание. Метод расчета размерных цепей, основанный на использовании этих зависимостей, получил название *метода максимума-минимума*. Он обеспечивает полную взаимозаменяемость, исключая появление брака.

Между тем вероятность такого сочетания составляющих звеньев у конкретного изделия весьма мала. Указанное обстоятельство, а также законы распределения размеров этих звеньев учитываются в *вероятностном методе* расчета размерных цепей, который отличается от метода максимума-минимума расчетом допуска замыкающего звена.

Полагая, что распределения размеров составляющих звеньев соответствуют нормальному закону, а границы полей рассеивания  $\omega_i = 6\sigma_{A_i}$  совпадают с границами их полей допусков, можно принять:

$$TA_i = 6\sigma_{A_i}$$

или

$$\sigma_{A_i} = \frac{1}{6} TA_i. \quad (1.20)$$

Так как среднее значение замыкающего звена представляет собой алгебраическую сумму средних значений составляющих звеньев, то в соответствии с известной в теории вероятностей теоремой о дисперсии суммы независимых случайных величин (составляющих звеньев) будем иметь:

$$\sigma_{A_{\Delta}}^2 = \sum_{i=1}^{n+p} \sigma_{A_i}^2.$$

Учитывая соотношение (1.20), можем записать:

$$(TA_{\Delta})^2 = \sum_{i=1}^{n+p} (TA_i)^2$$

или

$$TA_{\Delta} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n+p} (TA_i)^2}. \quad (1.21)$$

Отметим, что при расчете по формуле (1.21) у 0,27 % изделий значение замыкающего звена может выйти за пределы допуска.

В общем случае, в том числе при распределениях размеров составляющих звеньев, отличающихся от нормального, допуск замыкающего звена плоской размерной цепи с параллельными звеньями определяется по формуле

$$TA_{\Delta} = t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{n+p} \lambda_i^2 (TA_i)^2}, \quad (1.22)$$

где  $t_{\Delta}$  – коэффициент риска;  $\lambda_i$  – относительное среднее квадратическое отклонение (безразмерный коэффициент).

Это отклонение находится из соотношения

$$\lambda_i = \frac{2\sigma_{A_i}}{\omega_i}$$

или

$$\lambda_i = \frac{2\sigma_{A_i}}{TA_i}.$$

Коэффициент риска  $t_{\Delta}$  определяет вероятность попадания размеров замыкающего звена в пределы его поля допуска. Этот коэффициент выбирают из таблиц значений функции Лапласа  $\Phi(t)$  в зависимости от принятого риска  $P$ .

При нормальном законе распределения размеров замыкающего звена и равновероятном его выходе за обе границы поля допуска значение  $P$ , %, связано со значением  $\Phi(t)$  формулой

$$P = 100[1 - 2\Phi(t)]. \quad (1.23)$$

Ряд значений коэффициента  $t_{\Delta}$  приведен в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Риск $P$ , %	32	23	16	9	4,6	2,1	0,94	0,51	0,27	0,1
Коэффициент $t_{\Delta}$	1	1,2	1,4	1,7	2	2,3	2,6	2,8	3	3,3

Значения коэффициента  $\lambda_i^2$  составляют:

- при нормальном законе (законе Гаусса) распределения размеров составляющих звеньев  $\lambda_i^2 = 1/9$ ;
- при распределении по закону Симпсона (равнобедренного треугольника)  $\lambda_i^2 = 1/6$ ;
- при распределении по закону равной вероятности  $\lambda_i^2 = 1/3$ .

Нормальное распределение размеров чаще всего имеет место при крупносерийном и массовом производстве изделий, распределение по закону Симпсона – при серийном производстве, распределение по закону равной вероятности – при единичном производстве.

Если принять, что распределение размеров составляющих звеньев является нормальным, а риск  $P = 0,27\%$ , то  $\lambda_i^2 = 1/9$ , коэффициент  $t_\Delta = 3$  (см. табл. 1.1) и формула (1.22) преобразуется в формулу (1.21).

При расчетах размерных цепей возникают две основные задачи: прямая (проектная) и обратная (проверочная).

*Прямая задача* состоит в том, чтобы по известным номинальным значениям всех звеньев размерной цепи, допуску и предельным отклонениям замыкающего звена определить допуски и предельные отклонения составляющих звеньев.

*Обратная задача* заключается в том, чтобы по известным номинальным значениям, допускам и предельным отклонениям составляющих звеньев определить номинальное значение, допуск и предельные отклонения замыкающего звена.

### 1.3. О выявлении размерных цепей

При размерном анализе конструкций изделий важнейшим этапом является этап выявления размерных цепей, т. е. нахождение замыкающего звена и определение допуска на него, а также нахождение составляющих звеньев.

Замыкающие звенья и допуски на них в ряде случаев устанавливаются соответствующими стандартами (например, на зубчатые передачи, металлорежущие станки и другие изделия). В остальных ситуациях замыкающие звенья определяются из условий эксплуатации изделия или из условий его собираемости. Допуски на замыкающие звенья устанавливаются на основе опыта эксплуатации изделий-аналогов или путем расчетов и специальных экспериментов.

Например, для нормальной работы вала, установленного на двух шариковых подшипниках (рис. 1.7), необходим зазор между наружным кольцом правого подшипника и крышкой [6]. Этот зазор является замы-

кающим звеном размерной цепи, показанной на рис. 1.7. Для того чтобы в процессе эксплуатации подшипники не были зажаты, минимальный зазор  $A_{\Delta_{\text{нм}}}$  должен быть больше температурного удлинения вала. Это удлинение (в мм) может быть найдено по формуле [6]

$$\Delta l = \frac{11,7(t_2 - t_1)l}{10^6},$$

где  $t_2$  – рабочая температура вала, °С;  $t_1$  – температура окружающей среды, °С;  $l$  – длина вала, мм. Величина максимального зазора  $A_{\Delta_{\text{нб}}}$  назначается в зависимости от допускаемой осевой игры вала.

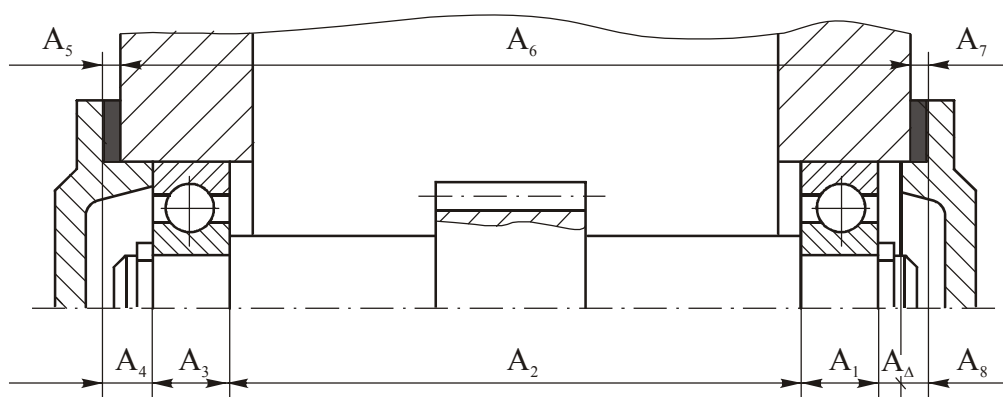


Рис. 1.7. Конструкторская размерная цепь

Примером, когда значение замыкающего звена размерной цепи определяется условием собираемости изделия, является следующий. Для соединения вала редуктора с валом электродвигателя жесткой муфтой необходимо, чтобы несовпадение осей валов (замыкающее звено) не превышало зазора между ними и отверстием муфты.

После нахождения замыкающего звена выявляются составляющие звенья размерной цепи. В число составляющих звеньев размерной цепи необходимо включать только тот размер детали, который непосредственно влияет на замыкающее звено. Это значит, что каждая деталь может участвовать в данной размерной цепи только одним из своих размеров.

Процедуру выявления составляющих звеньев рассмотрим на примере (рис. 1.7). Первой деталью, примыкающей к замыкающему звену слева, является наружное кольцо правого подшипника, размер  $A_1$  которого непосредственно влияет на  $A_{\Delta}$ . Следующей деталью, примыкающей к первой, является вал-шестерня, размер  $A_2$  которой также непосредственно влияет на  $A_{\Delta}$ . Далее следует наружное кольцо левого



подшипника с размером  $A_3$ , затем левая крышка с размером бурта  $A_4$ , прокладки размером  $A_5$ , корпус с размером  $A_6$ , прокладки размером  $A_7$ . Последней деталью, примыкающей справа к замыкающему звену, является правая крышка с размером бурта  $A_8$ . Из схемы размерной цепи (рис. 1.7) следует, что звенья  $A_5$ ,  $A_6$  и  $A_7$  являются увеличивающими, а остальные составляющие звенья – уменьшающими.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое размерная цепь?
2. Какое звено размерной цепи называется замыкающим?
3. На какие группы делятся составляющие звенья размерной цепи?
4. Как классифицируют размерные цепи?
5. Что такое связанные размерные цепи?
6. Как рассчитываются размерные цепи со звеньями, расположенными под углом к направлению замыкающего звена?
7. Из каких предпосылок исходят при расчете размерных цепей методом максимума-минимума?
8. Из каких предпосылок исходят при расчете размерных цепей вероятностным методом?
9. В чем заключается прямая задача теории размерных цепей?
10. В чем заключается обратная задача теории размерных цепей?

## 2. МЕТОДЫ ДОСТИЖЕНИЯ ТОЧНОСТИ ЗАМЫКАЮЩИХ ЗВЕНЬЕВ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ

Обеспечение точности создаваемой машины (на этапе конструирования) сводится в конечном счете к достижению необходимой точности замыкающих звеньев размерных цепей, заложенных в ее конструкцию. Задача обеспечения требуемой точности замыкающих звеньев может быть экономично решена одним из пяти методов: полной взаимозаменяемости, неполной взаимозаменяемости, групповой взаимозаменяемости, пригонки или регулировки.

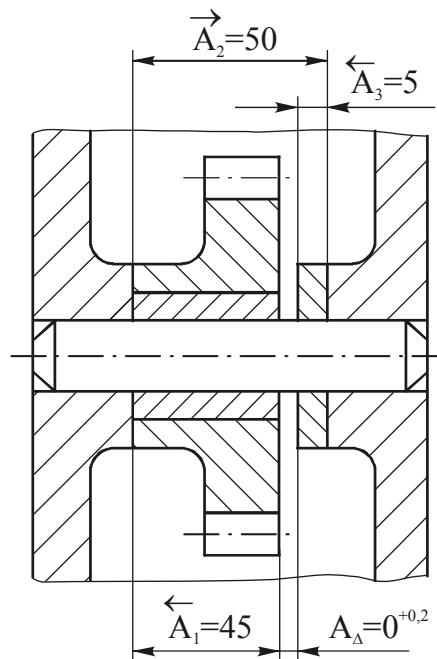


Рис. 2.1. Размерная цепь механизма

Рассмотрим решение этой задачи различными методами на примере размерной цепи, приведенной на рис. 2.1 [4, 9].

### 2.1. Метод полной взаимозаменяемости

При этом методе требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается во всех случаях ее реализации путем включения в нее составляющих звеньев без выбора, подбора или изменения их значений.

Широкое использование метода полной взаимозаменяемости объясняется следующими его преимуществами:

- простотой достижения требуемой точности замыкающего звена (например, использование этого метода при сборке сводит последнюю в простое соединение деталей);
- возможностью широкого кооперирования различных цехов и заводов при изготовлении отдельных деталей и сборочных единиц изделий;
- возможностью выполнения сборочных операций рабочими невысокой квалификации;
- простотой нормирования технологических процессов сборки.

Допуск и предельные отклонения составляющих звеньев размерной цепи рассчитывают методом максимума-минимума.

Расчет ведется в следующей последовательности.

1. Производится распределение допуска замыкающего звена между допусками составляющих звеньев. Эта локальная задача является многовариантной, так как для ее решения имеется только одно уравнение (1.5).

Для ориентировочных оценок допусков составляющих звеньев чаще всего используют способ равных допусков (равных влияний). В соответствии с ним допуск каждого составляющего звена принимают одним и тем же. Этот допуск [средний допуск  $(TA_i)_{cp}$ ] находят путем деления допуска замыкающего звена на число составляющих звеньев, т. е.

$$(TA_i)_{cp} = \frac{TA_{\Delta}}{n + p}.$$

Затем найденные указанным образом допуски составляющих звеньев корректируют с учетом сложности достижения точности каждого составляющего звена. В итоге стремятся снизить затраты на изготовление изделия.

Для рассматриваемого примера (рис. 2.1)

$$(TA_i)_{cp} = \frac{0,2}{3} \cong 0,067 \text{ (мм)}.$$

Наиболее сложным является обеспечение точности звена  $A_2$  – расстояния между внутренними стенками корпуса, поэтому допуск этого звена желательно взять значительно большим допусков звеньев  $A_1$  и  $A_3$ . С учетом этого подбором устанавливаем:  $TA_1 = 0,03$  мм;  $TA_2 = 0,15$  мм;  $TA_3 = 0,02$  мм.

2. На все составляющие звенья, кроме одного, назначаются предельные отклонения. Обычно для размеров отверстий (охватывающих размеров) отклонения назначаются по  $H$ , для валов (охватываемых размеров) – по  $h$ , для остальных – симметричные отклонения.

Принимаем:  $A_1 = 45_{-0,03}$  мм;  $A_2 = 50^{+0,15}$  мм.

3. Для определения предельных отклонений «оставшегося» звена сначала с помощью уравнения (1.16) находится координата середины поля допуска этого звена. Затем с использованием соотношений (1.14) и (1.15) уже определяются сами отклонения.

Для рассматриваемого примера «оставшимся» звеном является  $A_3$ .

Находим координату середины допуска этого звена:

$$\begin{aligned}\Delta_0 A_\Delta &= \Delta_0 \bar{A}_2 - \Delta_0 \bar{A}_1 - \Delta_0 \bar{A}_3; \\ 0,1 &= 0,075 - (-0,015) - \Delta_0 A_3.\end{aligned}$$

Отсюда

$$\Delta_0 A_3 = -0,01 \text{ (мм)}.$$

Предельные отклонения звена  $A_3$  составят:

$$\begin{aligned}\Delta_B A_3 &= \Delta_0 A_3 + \frac{TA_3}{2} = -0,01 + \frac{0,02}{2} = 0 \text{ (мм)}; \\ \Delta_H A_3 &= \Delta_0 A_3 - \frac{TA_3}{2} = -0,01 - \frac{0,02}{2} = -0,02 \text{ (мм)}.\end{aligned}$$

Таким образом, получим  $A_3 = 5_{-0,02}$  (мм).

Правильность решения прямой задачи проверим, решив обратную задачу.

1. С помощью уравнения (1.1) найдем номинальное значение замыкающего звена:

$$A_\Delta = \bar{A}_2 - \bar{A}_1 - \bar{A}_3 = 50 - 45 - 5 = 0 \text{ (мм)}.$$

2. С помощью уравнений (1.10) и (1.11) определим его предельные отклонения:

$$\begin{aligned}\Delta_B A_\Delta &= \Delta_B A_2 - \Delta_H A_1 - \Delta_H A_3 = 0,15 - (-0,03) - (-0,02) = 0,2 \text{ (мм)}; \\ \Delta_H A_\Delta &= \Delta_H A_2 - \Delta_B A_1 - \Delta_B A_3 = 0 - 0 - 0 = 0 \text{ (мм)}.\end{aligned}$$

Таким образом, получим  $A_\Delta = 0^{+0,2}$  мм, т. е. прямая задача решена верно.

Метод полной взаимозаменяемости, учитывающий возможность самого неблагоприятного сочетания предельных отклонений составляю-

щих звеньев, часто приводит к очень жестким (неэкономичным) допускам этих звеньев. Считается, что экономически оправданной областью применения метода полной взаимозаменяемости являются размерные цепи с небольшим числом звеньев (обычно  $n + p \leq 4$ ) и относительно широким допуском замыкающего звена.

## 2.2. Метод неполной взаимозаменяемости

Суть метода состоит в том, что требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается с некоторым заранее установленным риском путем включения в нее составляющих звеньев без выбора, подбора или изменения их значений. Преднамеренный риск выхода значений замыкающего звена за пределы допуска обычно невелик. Однако этот риск дает возможность (как будет показано ниже) очень существенно расширить допуски составляющих звеньев по сравнению с допусками, установленными методом полной взаимозаменяемости, и тем самым значительно снизить затраты на изготовление деталей и изделий в целом.

При методе неполной взаимозаменяемости расчет допусков составляющих звеньев ведется с использованием уравнения (1.22), полученного на основе положений теории вероятностей.

Решение прямой задачи рассмотренным методом производится следующим образом.

1. Задаемся значениями коэффициента риска  $t_\Delta$  и относительного среднего квадратического отклонения  $\lambda_i$ . Для рассматриваемого примера (рис. 2.1) примем, что риск  $P = 1\%$ , при котором  $t_\Delta = 2,57$  (см. табл. 1.1). Считая, что распределение размеров составляющих звеньев соответствует закону Гаусса, берем  $\lambda_i^2 = 1/9$ .

Для ориентировочных оценок допусков составляющих звеньев определяем средний допуск  $(TA_i)_{\text{cp}}$  по формуле

$$(TA_i)_{\text{cp}} = \frac{TA_\Delta}{t_\Delta \sqrt{\lambda_i^2 (n + p)}},$$

вытекающей из формулы (1.22). Для рассматриваемого примера получим

$$(TA_i)_{\text{cp}} = \frac{0,2}{2,57 \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 3}} = 0,135 \text{ (мм)}.$$

2. Используя формулу (1.22), подбором устанавливаем следующие допуски составляющих звеньев:  $TA_1 = 0,1$  мм;  $TA_2 = 0,2$  мм;  $TA_3 = 0,06$  мм.

Правильность подбора допусков проверяем по формуле (1.22):

$$TA_{\Delta} = t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{n+p} \lambda_i^2 (TA_i)^2} = 2,57 \sqrt{1/9 [(0,1)^2 + (0,2)^2 + (0,06)^2]} = 0,2 \text{ (мм)}.$$

В дальнейшем решение прямой задачи совпадает с ее решением методом максимума-минимума.

3. На все составляющие звенья, кроме одного, назначаем предельные отклонения. Принимаем:

$$A_1 = 45_{-0,1} \text{ мм}; A_2 = 50^{+0,2} \text{ мм}.$$

4. Находим координату середины поля допуска звена  $A_3$ :

$$\begin{aligned} \Delta_0 A_{\Delta} &= \Delta_0 \bar{A}_2 - \Delta_0 \bar{A}_1 - \Delta_0 \bar{A}_3; \\ 0,1 &= 0,1 - (-0,05) - \Delta_0 A_3. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\Delta_0 A_3 = 0,05 \text{ мм}.$$

Находим предельные отклонения звена  $A_3$ :

$$\begin{aligned} \Delta_B A_3 &= \Delta_0 A_3 + \frac{TA_3}{2} = 0,05 + \frac{0,06}{2} = 0,08 \text{ (мм)}; \\ \Delta_H A_3 &= \Delta_0 A_3 - \frac{TA_3}{2} = 0,05 - \frac{0,06}{2} = 0,02 \text{ (мм)}. \end{aligned}$$

Таким образом, получим  $A_3 = 5^{+0,08}_{+0,02}$  мм.

Правильность решения прямой задачи проверим, решив обратную задачу.

1. С помощью уравнения (1.1) найдем номинальное значение замыкающего звена:

$$A_{\Delta} = \bar{A}_2 - \bar{A}_1 - \bar{A}_3 = 50 - 45 - 5 = 0 \text{ (мм)}.$$

2. Найдем координату середины поля допуска замыкающего звена:

$$\Delta_0 A_{\Delta} = \Delta_0 \bar{A}_2 - \Delta_0 \bar{A}_1 - \Delta_0 \bar{A}_3 = 0,1 - (-0,05) - (-0,05) = 0,1 \text{ (мм)}.$$

3. Определим предельные отклонения замыкающего звена:

$$\begin{aligned} \Delta_B A_{\Delta} &= \Delta_0 A_{\Delta} + \frac{TA_{\Delta}}{2} = 0,1 + \frac{0,2}{2} = 0,2 \text{ (мм)}; \\ \Delta_H A_{\Delta} &= \Delta_0 A_{\Delta} - \frac{TA_{\Delta}}{2} = 0,1 - \frac{0,2}{2} = 0 \text{ (мм)}. \end{aligned}$$

Таким образом, получим  $A_{\Delta} = 0^{+0,2}$  мм, т. е. прямая задача решена верно.

Таблица 2.1

Метод обеспечения точности замыкающего звена	Составляющие звенья		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$
Полной взаимозаменяемости	$45_{-0,03}$	$50^{+0,15}$	$5_{-0,02}$
Неполной взаимозаменяемости	$45_{-0,1}$	$50^{+0,2}$	$5_{+0,02}^{+0,08}$

В табл. 2.1 сопоставлены результаты расчетов допусков и предельных отклонений составляющих звеньев рассматриваемой размерной цепи (рис. 2.1), выполненных методом полной и неполной взаимозаменяемости. Видно, что метод неполной взаимозаменяемости по сравнению с методом полной взаимозаменяемости позволяет даже для коротких размерных цепей значительно увеличить допуски составляющих звеньев. Экономический эффект от использования метода неполной взаимозаменяемости вместо метода полной взаимозаменяемости возрастает с уменьшением допуска замыкающего звена и увеличением числа звеньев размерной цепи.

### 2.3. Метод групповой взаимозаменяемости

При этом методе требуемая точность замыкающего звена достигается путем включения в размерную цепь составляющих звеньев, принадлежащих к соответственным группам, на которые они предварительно рассортированы.

Метод групповой взаимозаменяемости (называемый также селективной сборкой) обычно применяют при малом допуске замыкающего звена, обеспечить который методом неполной взаимозаменяемости оказывается затруднительно или даже невозможно. При использовании метода групповой взаимозаменяемости заданный допуск замыкающего звена  $TA_{\Delta}$  увеличивают в  $N$  раз ( $N$  – целое число). Расширенный допуск  $T'A_{\Delta} = TA_{\Delta} \cdot N$ , часто называемый производственным допуском, используют для расчета допусков составляющих звеньев размерной цепи. Детали, изготовленные с такими относительно широкими допусками, сортируют по размерам на  $N$  групп и каждой присваивают номер. Изделия собирают из деталей, принадлежащих к одной группе, что обеспечивает требуемый допуск замыкающего звена  $TA_{\Delta}$ .



Таким образом, при сборке изделий из деталей, принадлежащих к одной группе, допуск замыкающего звена  $TA_{\Delta}$  обеспечивается методом полной взаимозаменяемости.

При оценке экономической эффективности данного метода необходимо учитывать дополнительные расходы, связанные с точным измерением и сортировкой деталей по группам, их маркировкой и хранением. Организационные трудности и расходы возрастают при увеличении числа звеньев в размерной цепи и числа групп деталей. Этим объясняется то, что метод применяют для размерных цепей с числом звеньев не более четырех, а число групп деталей стремятся сделать возможно меньшим.

Для применения метода групповой взаимозаменяемости необходимо, чтобы выполнялись следующие условия.

1. Точность формы и расположения поверхностей деталей не должна превышать допуска их размера в группе. Очевидно, что если это условие не выполняется, то применение метода групповой взаимозаменяемости оказывается невозможным.
2. При распределении расширенного допуска замыкающего звена  $T'A_{\Delta}$  между составляющими звеньями необходимо, чтобы сумма допусков увеличивающих звеньев была равна сумме допусков уменьшающих звеньев, т. е.

$$\sum_{i=1}^n T'\bar{A}_i = \sum_{i=1}^p T'\bar{A}_i.$$

Если это равенство не будет соблюдаться, то среднее значение замыкающего звена изделий, собранных из деталей разных соответственных групп, будет различным.

Покажем это на примере трехзвенной размерной цепи [4], к которой можно свести любую многозвенную цепь.

На рис. 2.2 показана размерная цепь  $A$ , определяющая зазор между валом и отверстием во втулке. Уравнение этой размерной цепи

$$A_{\Delta} = \bar{A}_1 - \bar{A}_2.$$

Допуск  $TA_{\Delta}$  замыкающего звена увеличен в  $N$  раз.

В соответствии с расширенным допуском замыкающего звена установлены производственные допуски  $T'A_1$  и  $T'A_2$  составляющих звеньев, причем  $T'A_1 = T'A_2$ .

Каждое из полей допусков  $T'A_1$  и  $T'A_2$  разделено на  $N$  интервалов, т. е. образовано  $N$  групп деталей.

При этом

$$\begin{aligned} T^I A_1 &= T^{II} A_1 = \dots = T^N A_1; \\ T^I A_2 &= T^{II} A_2 = \dots = T^N A_2; \\ T^I A_1 + T^I A_2 &= T^{II} A_1 + T^{II} A_2 = \dots = T^N A_1 + T^N A_2 = T A_\Delta. \end{aligned}$$

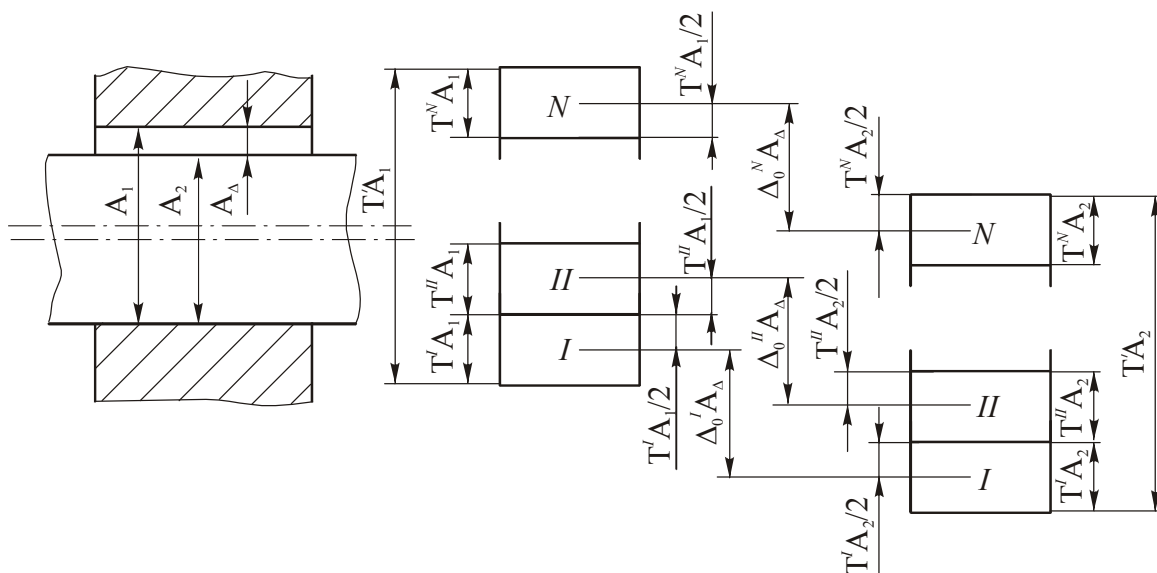


Рис. 2.2. Схема достижения точности замыкающего звена методом групповой взаимозаменяемости

Таким образом, соединение деталей, взятых из соответственных групп, обеспечит допуск  $T A_\Delta$  точно так же, как и при методе полной взаимозаменяемости.

Координаты середины поля допуска замыкающего звена:  
для первых интервалов  $T^I A_1$  и  $T^I A_2$

$$\Delta_0^I A_\Delta = \Delta_0^I A_1 - \Delta_0^I A_2;$$

для вторых интервалов  $T^{II} A_1$  и  $T^{II} A_2$

$$\Delta_0^{II} A_\Delta = (\Delta_0^I A_1 + T^I A_1) - (\Delta_0^I A_2 + T^I A_2).$$

Так как  $T^I A_1 = T^I A_2$ , то

$$\Delta_0^{II} A_\Delta = \Delta_0^I A_1 - \Delta_0^I A_2.$$

Таким образом, при равенстве расширенных допусков  $T^I A_1 = T^I A_2$  координаты середины полей допусков замыкающего звена и его средние значения в разных группах деталей будут одинаковыми.

Этого не произойдет при  $T'A_1 \neq T'A_2$  и соблюдении равенства  $T'A_1 + T'A_2 = T'A_\Delta$ .

Так, для вторых интервалов  $T''A_1$  и  $T''A_2$

$$\Delta_0'' A_\Delta = (\Delta_0' A_1 + T' A_1) - (\Delta_0' A_2 + T' A_2).$$

Но так как  $T' A_1 \neq T' A_2$ , то

$$\Delta_0'' A_\Delta \neq \Delta_0' A_\Delta,$$

то есть координаты середин полей допусков замыкающего звена и его средние значения в разных группах деталей будут разными.

3. Важным требованием, в значительной степени определяющим экономичность метода групповой взаимозаменяемости, является требование идентичности распределений размеров в пределах полей допусков. Только при соблюдении этого условия будет обеспечиваться комплектность изделий (рис. 2.3, а), не будет избытка одних и нехватки других деталей в группе, т. е. ситуации, показанной на рис. 2.3, б. Полностью избежать этого трудно. Поэтому при использовании метода групповой взаимозаменяемости практически всегда имеется незавершенное производство.

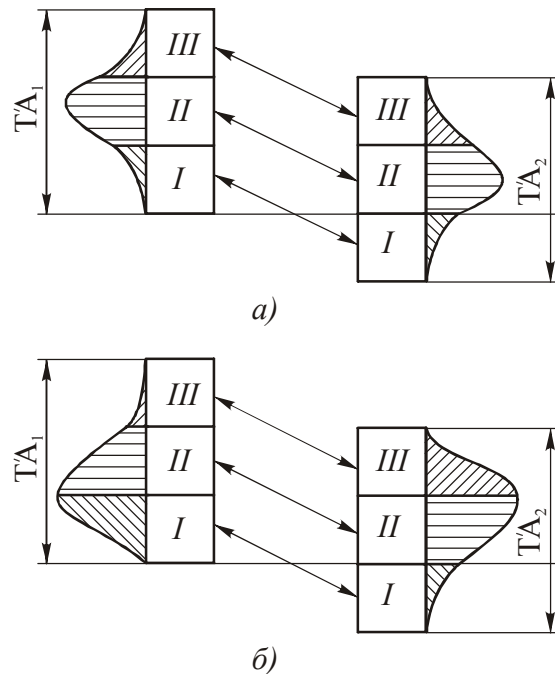


Рис. 2.3. Влияние характера распределений размеров на собираемость изделий (стрелки направлены к соответственным группам деталей)

Метод групповой взаимозаменяемости целесообразно использовать в крупносерийном и массовом производстве для соединений высокой точности. При изготовлении подшипников качения и сборке резьбовых соединений с натягом этот метод является единственным экономичным методом обеспечения точности.

Рассмотрим применение метода групповой взаимозаменяемости для обеспечения точности замыкающего звена в примере, показанном на рис. 2.1.

Напомним, что в этом примере замыкающее звено  $A_{\Delta} = 0^{+0,2}$  мм. Номинальные значения составляющих звеньев:  $A_1 = 45$  мм;  $A_2 = 50$  мм;  $A_3 = 5$  мм. Уравнение размерной цепи

$$A_{\Delta} = \bar{A}_2 - \bar{A}_1 - \bar{A}_3.$$

Допустим, что экономически целесообразным является расширение допуска замыкающего звена  $A_{\Delta}$  в три раза, т. е. число групп деталей  $N = 3$ . Расширенный допуск замыкающего звена

$$T'A_{\Delta} = TA_{\Delta} \cdot N = 0,2 \cdot 3 = 0,6 \text{ (мм)}.$$

Сумма расширенных допусков увеличивающих звеньев должна быть равна сумме расширенных допусков уменьшающих, т. е.

$$T'A_2 = T'A_1 + T'A_3 = \frac{1}{2} T'A_{\Delta}.$$

Отсюда

$$T'A_2 = \frac{1}{2} T'A_{\Delta} = \frac{0,6}{2} = 0,3 \text{ (мм)};$$

$$T'A_1 + T'A_3 = \frac{1}{2} T'A_{\Delta} = 0,3 \text{ (мм)}.$$

Учитывая сложность изготовления деталей, принимаем

$$T'A_1 = 0,24 \text{ мм и } T'A_3 = 0,06 \text{ мм}.$$

Соответственно, групповые допуски составят:

$$TA_1 = \frac{T'A_1}{N} = \frac{0,24}{3} = 0,08 \text{ (мм)};$$

$$TA_2 = \frac{T'A_2}{N} = \frac{0,3}{3} = 0,1 \text{ (мм)};$$

$$TA_3 = \frac{T'A_3}{N} = \frac{0,06}{3} = 0,02 \text{ (мм)}.$$

Для I группы деталей (см. табл. 2.2) примем следующие координаты середин полей допусков размеров:

$$\Delta_0 A_1 = -0,04 \text{ мм}; \Delta_0 A_2 = +0,05 \text{ мм}.$$

Координату середины поля допуска размера  $A_3$  найдем из уравнения

$$\begin{aligned} \Delta_0 A_\Delta &= \Delta_0 \bar{A}_2 - \Delta_0 \bar{A}_1 - \Delta_0 \bar{A}_3; \\ 0,1 &= 0,05 - (-0,04) - \Delta_0 A_3. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\Delta_0 A_3 = -0,1 + 0,05 + 0,04 = -0,01 \text{ (мм)}.$$

Координаты середины полей допусков размеров каждой следующей группы (табл. 2.2) получаются увеличением этой координаты предшествующей группы на величину группового допуска, т. е. для звена  $A_1$  – на 0,08 мм; для звена  $A_2$  – на 0,1 мм; для звена  $A_3$  – на 0,02 мм.

Две последние колонки этой таблицы показывают, что при соединении деталей соответствующих групп требуемое значение замыкающего звена будет обеспечено.

Номинальные значения и предельные отклонения составляющих звеньев в группах деталей приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.2

*Допуски и координаты середин полей допусков составляющих звеньев*

Группа	$TA_1$	$\Delta_0 A_1$	$TA_2$	$\Delta_0 A_2$	$TA_3$	$\Delta_0 A_3$	$TA_\Delta$	$\Delta_0 A_\Delta$
<i>I</i>	0,08	-0,04	0,1	+0,05	0,02	-0,01	0,2	0,1
<i>II</i>	0,08	+0,04	0,1	+0,15	0,02	+0,01	0,2	0,1
<i>III</i>	0,08	+0,12	0,1	+0,25	0,02	+0,03	0,2	0,1

Таблица 2.3

*Номинальные значения и предельные отклонения составляющих звеньев*

Группа	$A_1$	$A_2$	$A_3$
<i>I</i>	$45_{-0,08}$	$50^{+0,1}$	$5_{-0,02}$
<i>II</i>	$45^{+0,08}$	$50^{+0,2}_{+0,1}$	$5^{+0,02}$
<i>III</i>	$45^{+0,16}_{+0,08}$	$50^{+0,3}_{+0,2}$	$5^{+0,04}_{+0,02}$

## 2.4. Метод пригонки

Суть метода заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается изменением размера так называемого компенсирующего звена (одного из составляющих звеньев) путем снятия с него определенного слоя материала. На схеме размерной цепи обозначение компенсирующего звена, часто называемого просто компенсатором, заключается в прямоугольную рамку, например  $\boxed{A_1}$ .

При обеспечении точности замыкающего звена методом пригонки на все составляющие звенья устанавливают экономичные в данных производственных условиях допуски, а также задают координаты середин полей допусков:

$$\begin{aligned} T'A_1, T'A_2, \dots, T'A_{n+p}; \\ \Delta'_0 A_1, \Delta'_0 A_2, \dots, \Delta'_0 A_{n+p}. \end{aligned}$$

При этом допуск замыкающего звена  $T'A_\Delta$  может превышать требуемый  $TA_\Delta$ , т. е.

$$T'A_\Delta = \sum_{i=1}^{n+p} T'A_i > TA_\Delta.$$

Разность этих допусков называют наибольшей расчетной компенсацией

$$\delta_k = T'A_\Delta - TA_\Delta.$$

Она должна удаляться из размерной цепи путем снятия припуска с компенсирующего звена.

Последовательность и содержание пригоночных работ покажем на рассматриваемом примере (рис. 2.1), полагая, что в качестве компенсирующего звена взято проставочное кольцо толщиной  $\boxed{A_3}$ . Сперва производится предварительная сборка изделия (без установки проставочного кольца) и измеряется расстояние между торцом зубчатого колеса и стенкой корпуса. Размер компенсирующего звена  $\boxed{A_3}$  обычно определяют как разность этого расстояния и средней величины требуемого зазора  $A_\Delta$ . Далее изделие разбирают. Затем путем снятия с проставочного кольца припуска получают его требуемый размер и производят окончательную сборку изделия.

Произвольное назначение координат середин полей допусков составляющих звеньев может привести к тому, что у компенсирующего звена не будет нужного запаса материала для пригонки. Для того чтобы

обеспечить минимально необходимый запас материала (припуск) для пригонки, в координату середины поля допуска компенсирующего звена необходимо ввести поправку  $\Delta_k$ .

Следуя [4], получим формулу для вычисления  $\Delta_k$ . Для этого рассмотрим трехзвенную размерную цепь  $A$ , показанную на рис. 2.4. В этой цепи требуется обеспечить допуск замыкающего звена  $TA_\Delta$  и координату середины его поля допуска  $\Delta'_0 A_\Delta$ . На составляющие звенья  $A_1$  и  $A_2$  размерной цепи назначены допуски  $T'A_1$  и  $T'A_2$ , экономически целесообразные для данных производственных условий, и координаты середин полей допусков  $\Delta'_0 A_1$  и  $\Delta'_0 A_2$ . В качестве компенсирующего звена выбрано звено  $A_1$ .

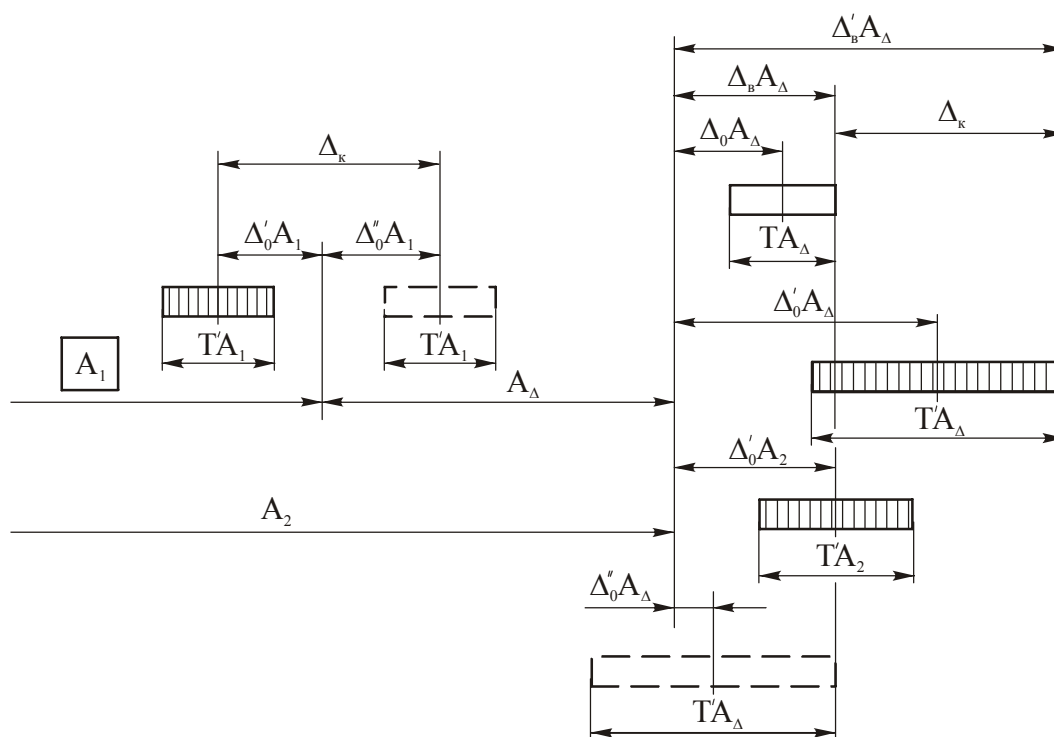


Рис. 2.4. Схема к определению поправки  $\Delta_k$

При принятых допусках и координатах середин полей допусков составляющих звеньев допуск замыкающего звена составит  $T'A_\Delta$ , а координата середины его поля будет  $\Delta'_0 A_\Delta$ . Видно (рис. 2.4), что верхнее отклонение замыкающего звена  $A_\Delta$  отстоит от верхней границы поля допуска  $T'A_\Delta$  на величину поправки  $\Delta_k$ . Ее значение может быть определено следующим образом:

$$\Delta'_B A_\Delta = \Delta_B A_\Delta + \Delta_k;$$

$$\Delta'_0 A_\Delta + 0,5T'A_\Delta = \Delta_0 A_\Delta + 0,5TA_\Delta + \Delta_k.$$

Из последнего выражения

$$\Delta_k = 0,5(T'A_\Delta - TA_\Delta) + \Delta'_0 A_\Delta - \Delta_0 A_\Delta.$$

Учитывая, что

$$T'A_\Delta - TA_\Delta = \delta_k,$$

получим следующую формулу для определения поправки  $\Delta_k$ :

$$\Delta_k = 0,5\delta_k + \Delta'_0 A_\Delta - \Delta_0 A_\Delta.$$

Так как компенсирующее звено  $\boxed{A_1}$  является уменьшающим, то для обеспечения минимально необходимого припуска на пригонку надо в координату  $\Delta'_0 A_1$  ввести поправку  $\Delta_k$ , придав полю допуска  $T'A_1$  положение, показанное штриховыми линиями и характеризуемое координатой  $\Delta''_0 A_1$ . Это изменит положение поля допуска  $T'A_\Delta$  (показано штриховыми линиями), приведет к совмещению его верхней границы с верхней границей  $TA_\Delta$  и обеспечит минимальный припуск на пригонку.

При произвольном числе составляющих звеньев размерной цепи формула для вычисления поправки  $\Delta_k$  примет вид

$$\Delta_k = 0,5\delta_k + \sum_{i=1}^{n+p} \xi \Delta'_0 A_i - \Delta_0 A_\Delta.$$

Если компенсирующее звено является уменьшающим (при пригонке его размер уменьшается), то поправку в координату середины его поля допуска вносят со своим знаком. Если компенсирующее звено является увеличивающим (при пригонке его размер возрастает), то поправку вносят со знаком, обратным полученному при вычислении.

При выборе компенсирующего звена в размерной цепи необходимо руководствоваться следующими соображениями.

1. В качестве компенсатора нужно выбирать деталь, изменение размера которой при пригонке является наиболее простым и требует наименьших затрат.
2. В качестве компенсатора недопустимо использовать деталь, размер которой является общим составляющим звеном параллельно связанных размерных цепей. Например (рис. 2.5), если выбрать в качестве компенсирующего звена  $A_2 = B_2$ , то, добившись требуемой точности  $A_\Delta$  за счет изменения  $A_2$ , уже нельзя изменить значение  $B_2$ , не нарушая точности  $A_\Delta$ .



Теперь рассмотрим применение метода пригонки для обеспечения точности замыкающего звена в примере размерной цепи, данной на рис. 2.1. В этом примере  $A_{\Delta} = 0^{+0,2}$  мм. Уравнение размерной цепи

$$A_{\Delta} = \vec{A}_2 - \vec{A}_1 - \vec{A}_3.$$

Номинальные значения составляющих звеньев:  $A_1 = 45$  мм;  $A_2 = 50$  мм;  $A_3 = 5$  мм.

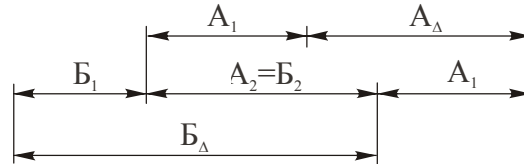


Рис. 2.5. Параллельно связанные размерные цепи

Выберем в качестве компенсирующего звено  $A_3$  – проставочное кольцо, толщина которого легко может быть изменена путем, например, плоского шлифования.

Установим на составляющие звенья экономически целесообразные допуски и зададим координаты середин их полей (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Звено	$T'A_i$ , мм	$\Delta'_0 A_i$ , мм
$A_1$	0,3	-0,15
$A_2$	0,4	+0,20
$A_3$	0,1	+0,25

При установленных допусках  $T'A_i$  допуск замыкающего звена

$$T'A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{n+p} T'A_i = 0,3 + 0,4 + 0,1 = 0,8 \text{ (мм)}.$$

Наибольшая возможная компенсация

$$\delta_k = T'A_{\Delta} - TA_{\Delta} = 0,8 - 0,2 = 0,6 \text{ (мм)}.$$

Для того, чтобы компенсатор имел минимально необходимую для пригонки толщину, в координату середины поля допуска компенсирующего звена  $A_3$  нужно ввести поправку:

$$\begin{aligned} \Delta_k &= 0,5\delta_k + \sum_{i=1}^{n+p} \xi_i \Delta'_0 A_i - \Delta_0 A_{\Delta} = \\ &= 0,5 \cdot 0,6 + (0,15 + 0,20 - 0,25) - 0,1 = 0,3 \text{ (мм)}. \end{aligned}$$

Так как компенсирующее звено является уменьшающим, то поправка  $\Delta_k$  должна быть введена в координату середины его поля допуска со своим знаком, т. е. получим

$$\Delta'_0 A_3 = 0,25 + 0,3 = 0,55 \text{ (мм)}.$$

Таким образом, размеры составляющих звеньев будут:  $A_1 = 45_{-0,3}$  мм;  $A_2 = 50^{+0,4}$  мм;  $A_3 = 5^{+0,6}_{+0,5}$  мм.

Основным достоинством пригонки является возможность достижения высокой точности замыкающего звена при относительно невысокой точности деталей.

Недостатками пригонки является необходимость использования рабочих высокой квалификации и значительные колебания затрат времени при ее выполнении из-за колебаний удаляемых припусков. Последнее затрудняет применение поточных методов производства.

Экономичной областью использования метода пригонки считается единичное и мелкосерийное производство.

## 2.5. Метод регулировки

Сущность метода регулировки заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается изменением размера компенсирующего звена без удаления материала с компенсатора.

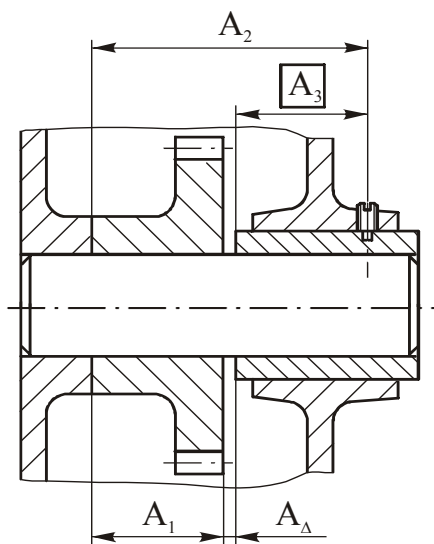
Принципиально метод регулировки аналогичен методу пригонки. Различие между ними состоит в способе изменения размера компенсирующего звена. При методе регулировки это изменение может быть выполнено двумя путями: изменением положения компенсирующего звена или введением в изделие специальной детали, имеющей требуемый размер. В первом случае компенсатор называют подвижным, во втором – неподвижным.

Примером подвижного компенсатора является втулка в механизме (рис. 2.6), перемещая которую в осевом направлении можно регулировать зазор  $A_\Delta$  между ее торцом и торцом зубчатого колеса. После установления требуемого зазора положение втулки фиксируют относительно корпуса стопорным винтом.

В качестве неподвижных компенсаторов используют проставочные кольца, прокладки и другие детали простой конструкции. Группы неподвижных компенсаторов разных размеров должны быть изготовлены заранее.

Последовательность действий при обеспечении требуемой точности замыкающего звена методом регулировки с использованием неподвижных компенсаторов покажем на рассматриваемом примере (рис. 2.1), считая, что роль неподвижного компенсатора выполняет про-

ставочное кольцо. Так же, как и в методе пригонки, сначала производится предварительная сборка изделия (без установки проставочного кольца), измеряется расстояние между торцом зубчатого колеса и стенкой корпуса и определяется размер компенсатора (подробнее вопрос о выборе этого размера будет рассмотрен ниже). После этого изделие разбирают, а затем окончательно собирают, устанавливая на него заранее изготовленное проставочное кольцо соответствующего размера.



*Рис. 2.6. Обеспечение точности зазора  $A_{\Delta}$  методом регулировки с применением подвижного компенсатора*

При методе регулировки, так же как и при методе пригонки, на составляющие звенья назначают приемлемые для данных производственных условий допуски и устанавливают координаты середин их полей.

При применении подвижного компенсатора определяют наибольшую возможную компенсацию  $\delta_k$ , которую учитывают при разработке конструкции подвижного компенсатора.

При применении неподвижного компенсатора необходимо учитывать, что он не в состоянии скомпенсировать собственный допуск. Поэтому в расчетах этот допуск учитывать нельзя. При установленных допусках  $T'A_i$  и координатах середин их полей  $\Delta'_0 A_i$  допуск замыкающего звена и координата середины его поля составит

$$T''A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{n+p-1} T'A_i;$$

$$\Delta''A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{n+p-1} \xi_i \Delta'_0 A_i.$$

Здесь  $n + p - 1$  означает, что при суммировании значения допуска компенсатора  $T'A_k$  и координата середины его поля  $\Delta'_0 A_k$  не учтены.

Наибольшая возможная компенсация

$$\delta_k = T''A_\Delta - TA_\Delta.$$

Далее необходимо определить число ступеней (групп) компенсаторов и их размеры.

Число ступеней компенсаторов находится по формуле

$$N_k = T''A_\Delta / (TA_\Delta - T'A_k).$$

Для определения размеров неподвижного компенсатора обратимся к рис. 2.7, на котором представлена размерная цепь  $A$  механизма, показанного на рис. 2.1. В этой цепи:  $A_1$  – ширина зубчатого колеса;  $A_2$  – расстояние между стенками корпуса механизма;  $A_3$  – толщина проставочного кольца (компенсатора);  $A_\Delta$  – зазор между проставочным кольцом и стенкой корпуса.

Произвольный выбор координат  $\Delta'_0 A_i$  середин полей допусков  $n + p - 1$  составляющих звеньев (размеров  $A_1$  и  $A_2$ ) может привести к расположению поля допуска  $T''A_\Delta$  относительно поля допуска  $TA_\Delta$ , не удобному для определения размеров компенсатора, например к положению, показанному на рис. 2.7 штриховыми линиями. Намного проще определять размеры компенсаторов при совмещении верхних или нижних границ полей допусков  $T''A_\Delta$  и  $TA_\Delta$ .

Найдем координату середины поля допуска  $T''A_\Delta$ , которая, например, позволит совместить нижние границы полей допусков  $T''A_\Delta$  и  $TA_\Delta$ .

Из схемы (рис. 2.7) можно записать

$$\Delta''_0 A_\Delta - 0,5T''A_\Delta = \Delta_n A_\Delta.$$

Отсюда

$$\Delta''_0 A_\Delta = \Delta_n A_\Delta + 0,5T''A_\Delta.$$

Так как  $\Delta_n A_\Delta$  задано условием задачи, а  $T''A_\Delta$  было уже определено, то значение  $\Delta''_0 A_\Delta$  становится известным.

Далее обычным путем по  $\Delta''_0 A_\Delta$  находят координаты середин полей допусков  $n + p - 1$  составляющих звеньев.

Координату середины поля допуска компенсирующего звена устанавливают независимо от координат середин полей допусков других составляющих звеньев. Для упрощения расчета размеров компенсаторов

рекомендуется задавать координату середины поля допуска со знаком «минус», т. е. как это показано на рис. 2.7.

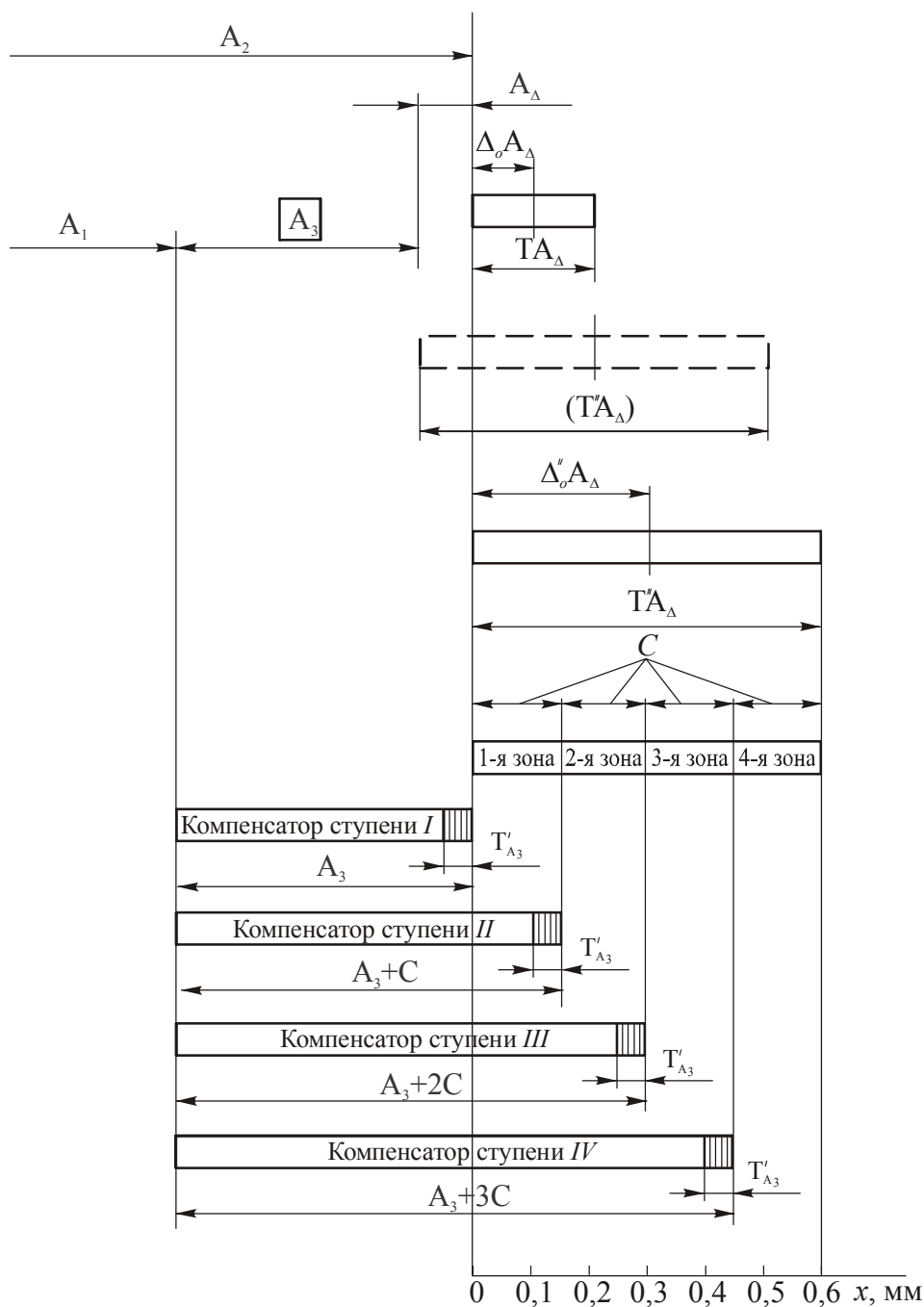


Рис. 2.7. Схема к определению размеров неподвижных компенсаторов

Номинальный размер компенсатора первой ступени равен номинальному размеру компенсатора. Номинальный размер компенсаторов каждой следующей ступени будет отличаться от номинального размера предшествующей ступени на величину  $C$  ступени компенсации:

$$C = TA_{\Delta} - T'A_{\kappa}.$$

Допуски компенсаторов всех ступеней остаются одними и теми же (см. рис. 2.7).

Теперь рассмотрим применение метода регулировки с использованием неподвижных компенсаторов для обеспечения точности замыкающего звена в примере, приведенном на рис. 2.1.

Напомним еще раз, что в этом примере  $A_{\Delta} = 0^{+0,2}$  мм. Номинальные значения составляющих звеньев:  $\bar{A}_1 = 45$  мм;  $\bar{A}_2 = 50$  мм;  $\bar{A}_3 = 5$  мм.

Допустим, что экономичными допусками в данных производственных условиях являются:  $T'A_1 = 0,2$  мм;  $T'A_2 = 0,4$  мм;  $T'A_3 = T'A_{\kappa} = 0,05$  мм.

Так как в рассматриваемой размерной цепи компенсирующим звеном является  $A_3$ , то компенсации подлежат допуски звеньев  $A_1$  и  $A_2$ .

Принятым допускам  $T'A_1$  и  $T'A_2$  этих звеньев соответствует расширенный допуск замыкающего звена

$$T''A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{n+p-1} T'A_i = 0,2 + 0,4 = 0,6 \text{ (мм)}.$$

Наибольшая величина компенсации

$$\delta_{\kappa} = T''A_{\Delta} - TA_{\Delta} = 0,6 - 0,2 = 0,4 \text{ (мм)}.$$

Число ступеней компенсаторов будет

$$N_{\kappa} = T''A_{\Delta} / (TA_{\Delta} - T'A_{\kappa}) = 0,6 / (0,2 - 0,05) = 4.$$

Найдем координаты середин полей допусков составляющих звеньев  $A_1$  и  $A_2$ , необходимых для совмещения нижних границ полей допусков  $T''A_{\Delta}$  и  $TA_{\Delta}$ . Координата середины поля допуска  $T''A_{\Delta}$ , отвечающая этому условию, составит:

$$\Delta_0''A_{\Delta} = \Delta_n A_{\Delta} + 0,5T''A_{\Delta} = 0 + 0,5 \cdot 0,6 = 0,3 \text{ (мм)}.$$

Принимаем координату середины поля допуска звена  $A_1$  равной  $-0,1$  мм. Координату середины поля допуска звена  $A_2$  найдем из уравнения

$$\Delta_0''A_{\Delta} = \Delta_0' \bar{A}_2 - \Delta_0' \bar{A}_1.$$

Отсюда

$$\Delta_0' \bar{A}_2 = \Delta_0''A_{\Delta} + \Delta_0' \bar{A}_1 = 0,3 - 0,1 = 0,2 \text{ (мм)}.$$

Таким образом, размеры  $A_1$  и  $A_2$  соответственно составят  $45_{-0,2}$  и  $50^{+0,4}$  мм.

Независимо от  $\Delta'_0 A_1$  и  $\Delta'_0 A_2$  координата середины поля допуска компенсирующего звена

$$\Delta'_0 A_3 = -0,5T'A_3 = -0,025 \text{ (мм)}.$$

При ступени компенсации

$$C = TA_{\Delta} - T'A_k = TA_{\Delta} - T'A_3 = 0,2 - 0,05 = 0,15 \text{ (мм)}$$

поле расширенного допуска замыкающего звена  $T'A_{\Delta}$  будет разделено на четыре зоны (см. рис. 2.7). Отклонения, возникающие в пределах той или иной зоны, компенсируются установкой проставочного кольца соответствующей ступени.

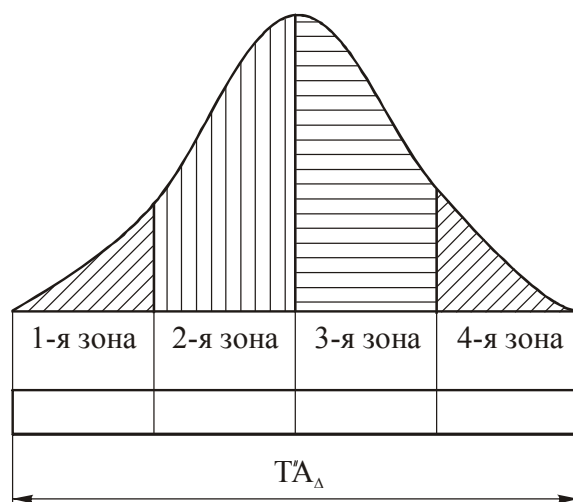
Определение необходимой ступени компенсатора для конкретного изделия производится следующим образом (см. рис. 2.1). Путем измерения в предварительно собранном изделии находим расстояние между торцом зубчатого колеса и стенкой корпуса. Вычитая из этого расстояния номинальное значение звена  $A_3 = 5$  мм, определяем отклонение  $x$  (рис. 2.7). По нему находим номер зоны  $T'A_{\Delta}$  и номер ступени компенсатора. Например, указанное выше расстояние у конкретного изделия составило 5,2 мм. Тогда отклонение  $x = 0,2$  мм, оно соответствует 2<sup>ой</sup> зоне и для его компенсации необходим компенсатор ступени II.

Номинальный размер компенсаторов ступени I равен номинальному размеру  $A_3$ . Номинальные размеры компенсаторов каждой следующей ступени будут отличаться от предшествующей на величину  $C$ . Размеры компенсаторов для рассматриваемого примера будут: ступень I –  $5_{-0,05}$  мм; ступень II –  $5,15_{-0,05}$  мм; ступень III –  $5,30_{-0,05}$  мм; ступень IV –  $5,45_{-0,05}$  мм.

Число неподвижных компенсаторов каждой ступени делают одинаковым, если нет данных о распределении размеров (отклонений) в пределах расширенного поля допуска  $T'A_{\Delta}$ . Если такие данные есть, то число компенсаторов каждой ступени изготавливают пропорционально площадям под кривой распределения, соответствующим различным зонам (рис. 2.8).

Метод регулировки обладает следующими достоинствами.

1. Возможно достижение любой степени точности замыкающего звена при достаточно широких допусках составляющих звеньев.
2. Затраты времени на выполнение регулировочных работ невелики.
3. Не создается заметных трудностей при нормировании и организации сборочных работ.
4. Обеспечивается возможность поддержания требуемой точности замыкающего звена в процессе эксплуатации изделий, теряемой, например, из-за изнашивания деталей.



*Рис. 2.8. К определению числа неподвижных компенсаторов каждой ступени компенсации*

На практике задачи обеспечения требуемой точности замыкающих звеньев часто приходится решать для связанных размерных цепей (см. рис. 1.6 и 2.5). В этом случае решение прямой задачи начинают с размерной цепи с наименьшим допуском замыкающего звена. Затем переходят к размерной цепи со следующим по величине допуском замыкающего звена и т. д. При этом для каждой отдельной размерной цепи может быть избран тот или иной метод достижения точности замыкающего звена. Решение обратной задачи может выполняться в любой последовательности отдельных размерных цепей.

Выше методы обеспечения точности замыкающих звеньев были рассмотрены применительно к размерным цепям, звенья которых представляют собой линейные размеры. Для размерных цепей с угловыми размерами, заданными в градусной мере и имеющих общие вершины углов (см. рис. 1.1, *в* и 1.1, *г*), методики расчетов и расчетные зависимости остаются такими же, как для размерных цепей с линейными размерами.

Следует отметить, что на практике размерные цепи с указанными угловыми размерами встречаются сравнительно редко. Гораздо чаще приходится иметь дело с угловыми размерными цепями, звенья которых представляют собой отклонения расположения поверхностей или их осей. Эти отклонения (допуски), как известно, обычно задают в линейных единицах, отнесенных к определенной длине. Перейдем к рассмотрению методик построения схем и расчета таких размерных цепей.



### Контрольные вопросы

1. В чем состоит сущность метода полной взаимозаменяемости?
2. В чем состоит сущность метода неполной взаимозаменяемости?
3. В чем состоит сущность метода групповой взаимозаменяемости?
4. В чем состоит сущность метода пригонки?
5. В чем состоит сущность метода регулировки с применением подвижных компенсаторов?
6. В чем состоит сущность метода регулировки с применением неподвижных компенсаторов?
7. Укажите области применения различных методов достижения точности замыкающих звеньев размерных цепей.
8. Назовите этапы решения прямой задачи методами полной и неполной взаимозаменяемости.
9. Какими соображениями нужно руководствоваться при распределении допуска замыкающего звена между допусками составляющих звеньев?
10. Назовите условия применимости метода групповой взаимозаменяемости.
11. Почему при использовании метода групповой взаимозаменяемости практически всегда образуется незавершенное производство?
12. Почему при выполнении пригонки наблюдается значительное колебание затрат времени?
13. Как определяется число неподвижных компенсаторов каждой ступени компенсации?


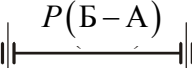
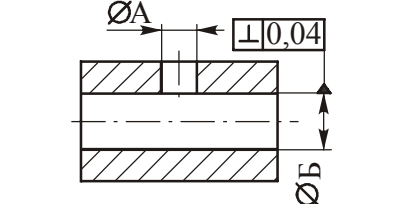
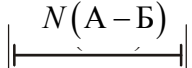
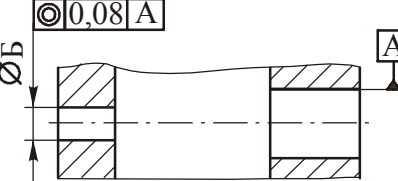
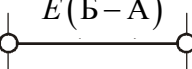
### 3. РАСЧЕТ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ СО ЗВЕНЬЯМИ В ВИДЕ ОТКЛОНЕНИЙ РАСПОЛОЖЕНИЯ

#### 3.1. Расчет подетальных размерных цепей

К отклонениям расположения поверхностей или их осей относятся: отклонения от параллельности, соосности, перпендикулярности и др.

Рассмотрим, следуя [5], основные особенности построения и расчета цепей отклонений расположения. Сделаем это сначала на примерах подетальных размерных цепей. В табл. 3.1 приведены условные обозначения допусков расположения поверхностей на чертежах деталей, наименование соответствующих технических требований, форма записи отклонений расположения и их условное обозначение на схемах размерных цепей.

Таблица 3.1

Условное обозначение допусков расположения	Наименование технических требований	Формы записи отклонения расположения и его условное обозначение на схеме размерной цепи
	Допуск параллельности поверхности Б относительно А 0,05 мм	$P(B - A) = 0 \pm 0,05$ 
	Допуск перпендикулярности оси отверстия А относительно оси отверстия Б 0,04 мм	$N(A - B) = 0 \pm 0,04$ 
	Допуск соосности отверстия Б относительно отверстия А 0,08 мм	$E(B - A) = 0 \pm 0,08$ 

На рис. 3.1 показан ступенчатый валик с заданным допуском соосности ступени II относительно ступени I. Искомой величиной является высота ступени  $A_{\Delta}$  (замыкающее звено). Так как направление смещения оси 2 относительно оси 1 произвольно, то размерные цепи с замыкающим звеном  $A_{\Delta}$  могут быть двух видов. Для размерной цепи на рис. 3.1, а высота ступени

$$A_{\Delta} = A_1 - A_2 - (E2 - 1).$$

Для размерной цепи на рис. 3.1, б высота ступени

$$A_{\Delta} = A_1 - A_2 + (E2 - 1).$$

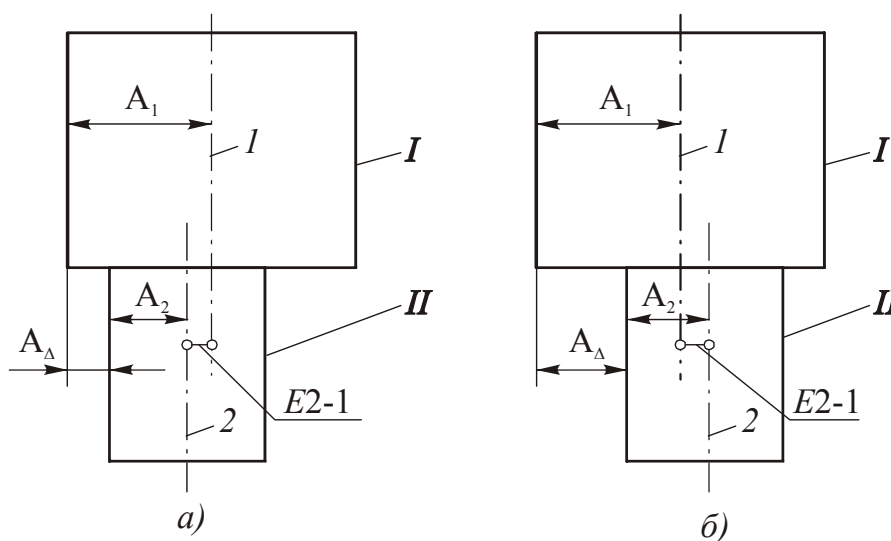


Рис. 3.1. Схема определения отклонений от соосности

Из этих уравнений видно, что в одной и той же цепи отклонение от соосности может быть как увеличивающим (рис. 3.1, б), так и уменьшающим (рис. 3.1, а) звеном.

Запишем выражения для  $A_{\Delta_{нб}}$ . Если  $E2 - 1$  уменьшающее звено, то

$$A_{\Delta_{нб}} = A_{1_{нб}} - A_{2_{нм}} - (E2 - 1)_{нм}.$$

Если  $E2 - 1$  увеличивающее звено, то

$$A_{\Delta_{нб}} = A_{1_{нб}} - A_{2_{нм}} + (E2 - 1)_{нб}.$$

Вычитая второе выражение из первого, получаем

$$(E2 - 1)_{нм} = -(E2 - 1)_{нб}.$$

Отсюда следует, что наименьшее отклонение от соосности является отрицательной величиной. В то же время совершенно ясно, что

наименьшее отклонение от соосности равно нулю. Знак в данном случае учитывает направление смещения оси 2 относительно оси 1.

Так как номинальные значения отклонений расположения, как правило, равны нулю, а предельные отклонения всегда симметричны, то отнесение звеньев размерных цепей в виде отклонений расположения к любой категории (увеличивающих или уменьшающих) не сказывается на результатах расчета этих цепей.

Построим цепь отклонений от соосности для ступенчатого валика с центровыми отверстиями (рис. 3.2). Допустим, что отклонение от соосности ступени 2 относительно ступени 1  $E2-1 = 0 \pm 0,1$  мм, а отклонение от соосности ступени 1 относительно оси 3 центровых отверстий  $E1-3 = 0 \pm 0,05$  мм. Отклонение от соосности ступени 2 относительно оси 3 центровых отверстий, которое не указано на чертеже валика, будет замыкающим звеном в размерной цепи, показанной на рис. 3.2, б. (Замыкающее звено показано двойной линией, а его условное обозначение заключено в квадратные скобки.)

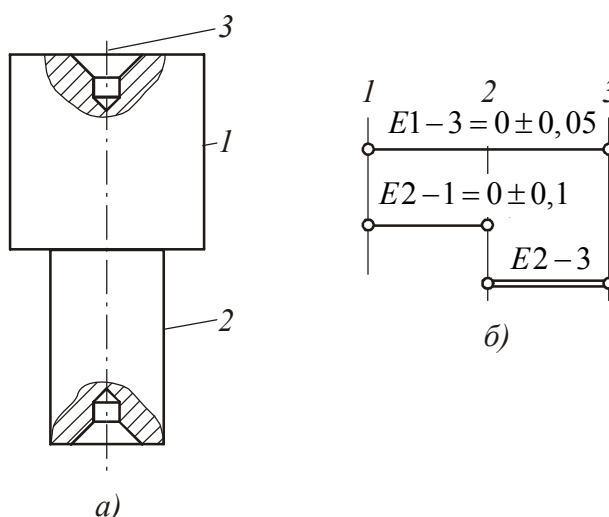


Рис. 3.2. Ступенчатый валик (а)  
и размерная цепь отклонений от соосности (б)

Построение размерной цепи выполняется следующим образом. Наносятся примерно равноотстоящие друг от друга вертикальные (или горизонтальные) линии, число которых равно числу осей. При этом считается, что каждая цилиндрическая поверхность имеет свою ось (оси 1 и 2). Центровые отверстия имеют ось 3. Затем наносятся отклонения от соосности  $E1-3$  и  $E2-1$ , представляющие собой составляющие звенья размерной цепи. Отклонение от соосности ступени 2 относительно оси центровых отверстий 3  $E2-3$  является замыкающим звеном. Решение прямой и обратной задач для такой размерной цепи оказывается очень простым, так

как все составляющие звенья имеют номинальные значения, равные нулю, и симметричные отклонения. При этом номинальное значение и координата середины поля допуска замыкающего звена также будут равны нулю. Допуск замыкающего звена составит

$$T_{2-3} = T_{1-3} + T_{2-1} = 0,1 + 0,2 = 0,3 \text{ (мм)}.$$

Замыкающее звено может быть записано в виде

$$[E2 - 3] = 0 \pm 0,15 \text{ (мм)}.$$

Таким образом, допуск отклонений расположения поверхностей (осей) учитывает направление этих отклонений и оказывается в два раза больше допуска расположения, указываемого в чертежах изделий.

Построение цепей отклонений расположения для корпусных деталей является более сложным процессом в связи с необходимостью суммирования отклонений от перпендикулярности с отклонениями от параллельности.

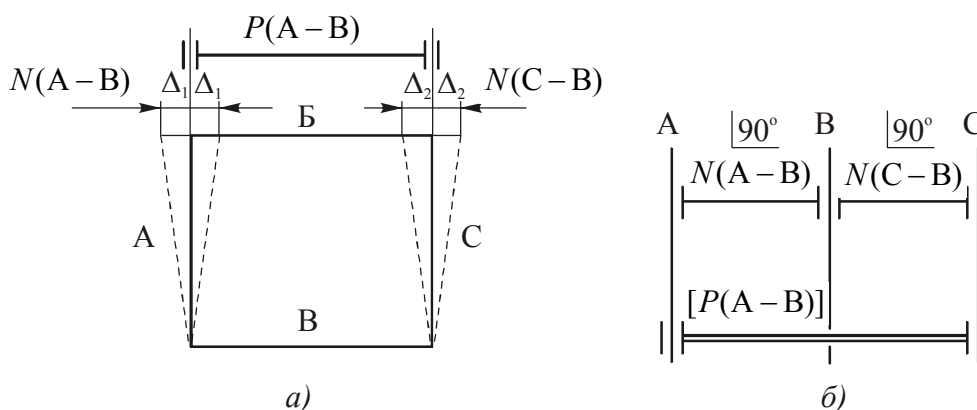


Рис. 3.3. Построение цепей отклонения расположения для корпусных деталей:

а – схема учета отклонений от параллельности и перпендикулярности;

б – цепь отклонений расположения

У показанного на рис. 3.3, а прямоугольника отклонения от перпендикулярности стороны А относительно В, т. е.  $N(A - B)$  может быть представлено как смещение точки пересечения сторон А и В на величину  $\pm\Delta_1$  от номинального положения. Аналогично отклонение от перпендикулярности стороны С относительно В, т. е.  $N(C - B)$  может быть представлено как смещение точки пересечения сторон С и В на величину  $\pm\Delta_2$  от номинального положения. Отклонение от параллельности стороны А относительно С представляет собой колебание длины стороны В и очевидно равно сумме смещений  $\pm\Delta_1$  и  $\pm\Delta_2$ . Таким образом, отклонение от параллельности стороны А относительно С будет опреде-

лено как замыкающее звено размерной цепи, показанной на рис. 3.3, б. Здесь вертикальные линии соответствуют сторонам А, В и С прямоугольника. Горизонтальные линии, соединяющие стороны А с В и В с С, представляют собой отклонения от перпендикулярности  $N(A - B)$  и  $N(C - B)$  (составляющие звенья). Двойная горизонтальная линия, соединяющая стороны А и С, представляет собой отклонение от параллельности стороны А относительно С, т. е. замыкающее звено  $[P(A - C)]$ . Значение этого звена определится из выражения

$$[P(A - C)] = N(A - B) + N(C - B).$$

Необходимо учитывать, что отклонения от параллельности и перпендикулярности не обладают свойством обратимости. Из рис. 3.4 видно, что отклонения от параллельности  $P1 - 2$  и  $P2 - 1$ , измеренные в абсолютных величинах, не равны между собой. В то же время при расчете цепей отклонений расположения необходимо, чтобы величины отклонений не зависели от выбора базы. Это можно сделать двумя путями. Первый из них состоит в переходе к удельным отклонениям, т. е. отклонениям, отнесенным к единице длины. Тогда

$$(P1 - 2) : B = (P2 - 1) : B$$

или

$$(P1 - 2)_{уд} = (P2 - 1)_{уд}.$$

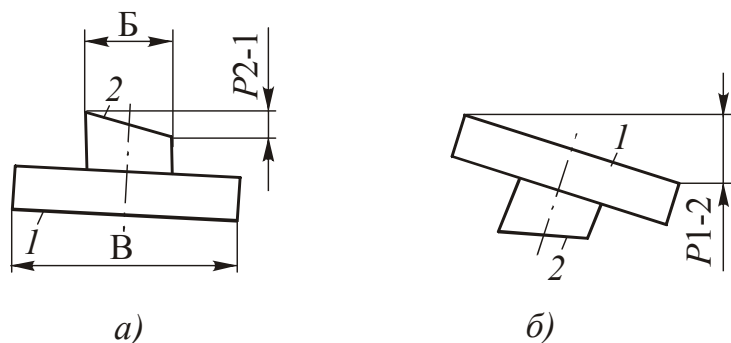


Рис. 3.4. Схема, иллюстрирующая необратимость отклонений от параллельности:

а – измерение отклонения от параллельности плоскости 2 относительно плоскости 1;

б – измерение отклонения от параллельности плоскости 1 относительно плоскости 2

После расчета нужно выполнить обратный переход к абсолютным значениям отклонений. Второй путь заключается в переходе к отклонениям, отнесенным к одной (общей) длине. Предположим, например, что

отклонения от параллельности заданы следующим образом:  $0 \pm 0,02$  мм на длине  $l_1 = 100$  мм;  $0 \pm 0,05$  мм на длине  $l_2 = 300$  мм;  $0 \pm 0,03$  мм на длине  $l_3 = 200$  мм. Примем общую длину равной 300 мм. Тогда отклонения, отнесенные к этой длине, составят:  $(0 \pm 0,02) \frac{300}{100} = 0 \pm 0,06$  (мм);  $(0 \pm 0,05) \frac{300}{300} = 0 \pm 0,05$  (мм);  $(0 \pm 0,03) \frac{300}{200} = 0 \pm 0,045$  (мм). После расчета нужно опять перейти к отклонениям на заданных длинах  $l_1$ ,  $l_2$  и  $l_3$ .

Рассмотрим пример расчета отклонений расположения для детали, показанной на рис. 3.5. Отклонения расположения торцовых поверхностей 1–3 относительно друг друга и оси 4 центральных отверстий заданы в абсолютных значениях в виде технических требований (рис. 3.5).

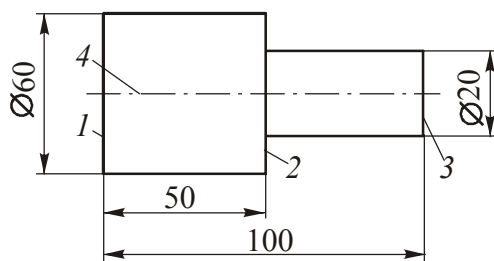


Рис. 3.5. Чертеж детали

к примеру расчета цепей отклонений расположения:  
 $N3-4 = 0 \pm 0,04$ ;  $P1-3 = 0 \pm 0,06$ ;  $P1-2 = 0 \pm 0,02$

Исходя из заданных значений отклонений расположения  $N3-4$ ,  $P1-3$  и  $P1-2$ , могут быть определены отклонения  $N2-4$ ,  $P2-3$  и  $N1-4$  как замыкающие звенья размерных цепей, представленных на рис. 3.6. Так, удельное отклонение от перпендикулярности торца 2 относительно оси 4 определится из уравнения

$$\begin{aligned} [N2-4]_{\text{уд}} &= (N3-4)_{\text{уд}} + (P1-3)_{\text{уд}} + (P1-2)_{\text{уд}} = \\ &= (0 \pm 0,04) : 20 + (0 \pm 0,06) : 60 + 0 \pm (0,02) : 60 = 0 \pm 0,00333. \end{aligned}$$

Абсолютное отклонение от перпендикулярности торца 2 относительно оси 4 составит:

$$[N2-4] = [N2-4]_{\text{уд}} \cdot 60 = (0 \pm 0,00333) \cdot 60 = 0 \pm 0,2 \text{ (мм)}.$$

Аналогично

$$\begin{aligned} [P2-3]_{\text{уд}} &= (P1-2)_{\text{уд}} + (P1-3)_{\text{уд}} = \\ &= (0 \pm 0,02) : 60 + (0 \pm 0,06) : 60 = 0 \pm 0,001333. \end{aligned}$$

Абсолютное отклонение от параллельности торца 2 относительно торца 3

$$[P2-3] = [P2-3]_{\text{уд}} \cdot 60 = (0 \pm 0,001333) \cdot 60 = 0 \pm 0,08 \text{ (мм)}.$$

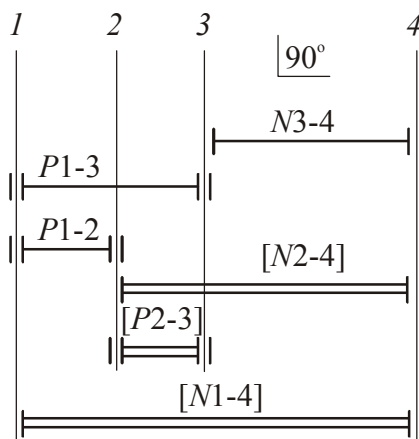


Рис. 3.6. Размерные цепи отклонений расположения для детали, показанной на рис. 3.5

Наконец, удельное отклонение от перпендикулярности торца 1 относительно оси 4 будет

$$\begin{aligned} [N1-4]_{\text{уд}} &= (P1-3)_{\text{уд}} + (N3-4)_{\text{уд}} = \\ &= (0 \pm 0,06) : 60 + (0 \pm 0,04) : 20 = 0 \pm 0,003. \end{aligned}$$

Абсолютное значение этого отклонения составит

$$[N1-4] = [N1-4]_{\text{уд}} \cdot 60 = (0 \pm 0,003) \cdot 60 = 0 \pm 0,18 \text{ (мм)}.$$

### 3.2. Расчет сборочной размерной цепи

Выше на примерах подетальных размерных цепей отклонений расположения было рассмотрено решение обратной задачи. Теперь на примере сборочной размерной цепи отклонений расположения рассмотрим решение прямой задачи.

На рис. 3.7 приведена конструктивная схема универсально-фрезерного станка. Исходя из его служебного назначения установлено, что замыкающее звено – отклонение от параллельности оси 1 шпинделя относительно рабочей плоскости 6 стола  $[P1-6] = \pm 0,03$  мм. Требуется найти отклонения расположения составляющих звеньев размерной цепи станка.

К составляющим звеньям этой цепи относятся:

- отклонение от перпендикулярности оси 1 шпинделя относительно направляющих 2 станины –  $N1-2$ ;



- отклонение от перпендикулярности направляющих 3 консоли относительно направляющих 2 станины –  $N3 - 2$ ;
- отклонение от параллельности плоскости 4 относительно направляющих 3 консоли  $P4 - 3$ ;
- отклонение от параллельности плоскости 5 относительно плоскости 4  $P5 - 4$ ;
- отклонение от параллельности плоскости 6 относительно плоскости 5  $P6 - 5$ .

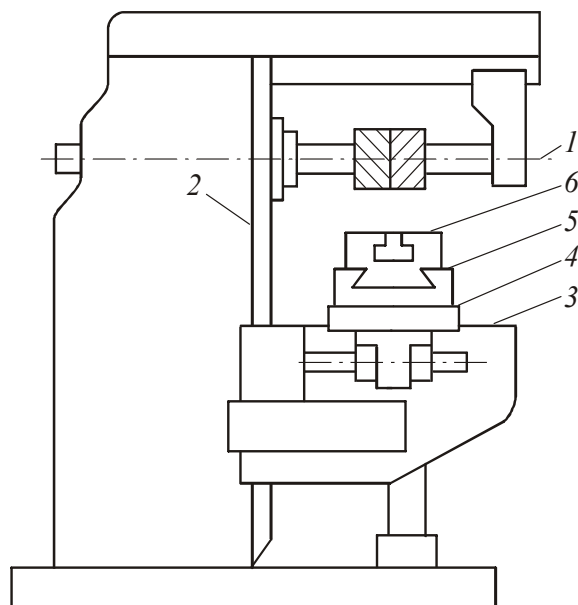


Рис. 3.7. Универсально-фрезерный станок.  
 $[P1 - 6] = \pm 0,03$  мм на длине 300 мм

Размерная цепь отклонений расположения универсально-фрезерного станка приведена на рис. 3.8.

Решение прямой задачи в данном случае по сути сводится к распределению допуска отклонений расположения замыкающего звена между допусками отклонений расположения составляющих звеньев. Для простоты примем, что все отклонения расположения заданы на одной и той же длине, например 300 мм. В этом случае необходимость перехода к удельным отклонениям расположения или к отклонениям на общей длине отпадает.

Рассмотрим решение этой задачи методом полной и неполной взаимозаменяемости, т. е. используя соответственно метод максимума-минимума и вероятностный метод.

При использовании метода максимума-минимума допуск замыкающего звена размерной цепи с допусками составляющих звеньев для рассматриваемого примера связаны зависимостью

$$T_{1-6} = T_{1-2} + T_{3-2} + T_{4-3} + T_{5-4} + T_{6-5}.$$

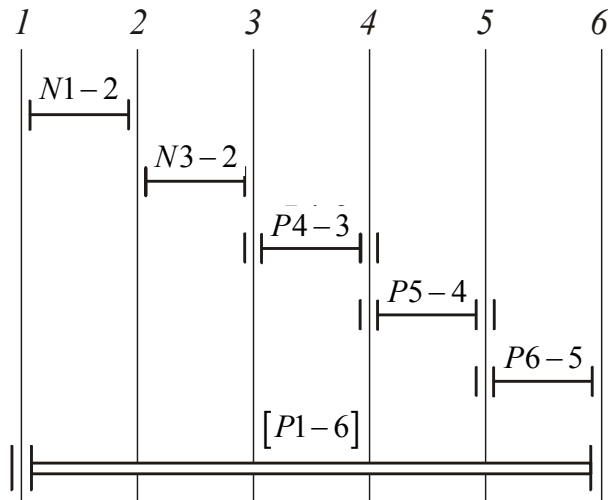


Рис. 3.8. Размерная цепь отклонений расположения деталей универсально-фрезерного станка

Учитывая трудности изготовления и монтажа отдельных деталей, подбором установим следующие допуски отклонений расположения:

$$T_{1-2} = 0,016 \text{ (мм)}; T_{3-2} = 0,014 \text{ (мм)}; T_{4-3} = T_{5-4} = T_{6-5} = 0,01 \text{ (мм)}.$$

Отклонения расположения составляющих звеньев будут:

$$N1-2 = 0 \pm 0,008 \text{ мм}; N3-2 = 0 \pm 0,007 \text{ мм}; \\ P4-3 = P5-4 = P6-5 = 0 \pm 0,005 \text{ мм}.$$

При использовании вероятностного метода допуск замыкающего звена через допуски составляющих звеньев для данного примера выразится так:

$$T_{1-6} = t_{\Delta} \sqrt{\lambda_i^2 (T_{1-2}^2 + T_{3-2}^2 + T_{4-3}^2 + T_{5-4}^2 + T_{6-5}^2)}.$$

Будем считать, что распределение отклонений расположения соответствует закону Симпсона, для которого  $\lambda_i^2 = \frac{1}{6}$ . Примем риск  $P$  выхода значений замыкающего звена за пределы установленного поля допуска равным 1%. При этом значение коэффициента риска  $t_{\Delta} = 2,57$  (см. табл. 1.1). Учитывая трудности достижения точности каждого составляющего звена, подбором устанавливаем следующие допуски отклонений расположения:

$$T_{1-2} = 0,03 \text{ мм}; T_{3-2} = 0,03 \text{ мм}; \\ T_{4-3} = 0,024 \text{ мм}; T_{5-4} = 0,024 \text{ мм}; T_{6-5} = 0,02 \text{ мм}.$$

Правильность подбора допусков отклонений расположения проверяем, подставляя их значения в формулу

$$T_{1-6} = t_{\Delta} \sqrt{\lambda_i^2 (T_{1-2}^2 + T_{3-2}^2 + T_{4-3}^2 + T_{5-4}^2 + T_{6-5}^2)} = \\ = 2,57 \sqrt{\frac{1}{6} [(0,03)^2 + (0,03)^2 + (0,024)^2 + (0,024)^2 + (0,02)^2]} = 0,06 \text{ (мм)}.$$

Следовательно, эти допуски установлены верно.

Таким образом, отклонения расположения составляющих звеньев составят:

$$N1 - 2 = 0 \pm 0,015 \text{ (мм); } N3 - 2 = 0 \pm 0,015 \text{ (мм);} \\ P4 - 3 = 0 \pm 0,012 \text{ (мм); } P5 - 4 = 0 \pm 0,012 \text{ (мм);} \\ P6 - 5 = 0 \pm 0,01 \text{ (мм)}.$$

Сопоставляя результаты расчетов, выполненных двумя методами, убеждаемся, что при риске  $P=1\%$  вероятностный метод по сравнению с методом максимума-минимума дает возможность увеличить допуски отклонений расположения составляющих звеньев примерно в два раза и таким образом делает их более легко достижимыми.

### **Контрольные вопросы**

1. Что понимается под допуском отклонений расположения?
2. Как строятся размерные цепи с параллельными звеньями в виде отклонений расположения?
3. Что понимается под свойством обратимости отклонений расположения?
4. Что такое удельное отклонение расположения?
5. Почему при расчете размерных цепей со звеньями в виде отклонений расположения можно не выделять увеличивающие и уменьшающие звенья?
6. Как решаются прямая и обратная задачи для размерных цепей со звеньями в виде отклонений расположения (методом максимума-минимума)?

## 4. ПРИМЕРЫ РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИЙ ИЗДЕЛИЙ

### 4.1. Обеспечение точности положения сборочных единиц изделия

Как известно, машины состоят из отдельных сборочных единиц (узлов). Их монтируют на раме, станине или плите. Например, насосный агрегат состоит из установленных на раме электродвигателя и насоса и соединяющей их валы муфты. Ясно, что нормальная работа машины будет обеспечена, если сборочные единицы будут занимать строго определенное положение друг относительно друга, т. е. будет обеспечена требуемая точность замыкающих звеньев размерных цепей, определяющих это положение.

На рис. 4.1 приведена [3] конструктивная схема изделия, состоящего из установленных на плите 1 электродвигателя 2 и редуктора 3, валы которых соединены упругой муфтой 4. Электродвигатель 2 закреплен на плите 1 через прокладку 5. Для упругой муфты радиальное смещение осей валов допускается до 0,4 мм, а угол их перекоса – до  $1^\circ$ . Следовательно, допуск радиального смещения осей валов составляет 0,8 мм, а допуск перекоса осей (допуск отклонений от параллельности) –  $2^\circ$ .

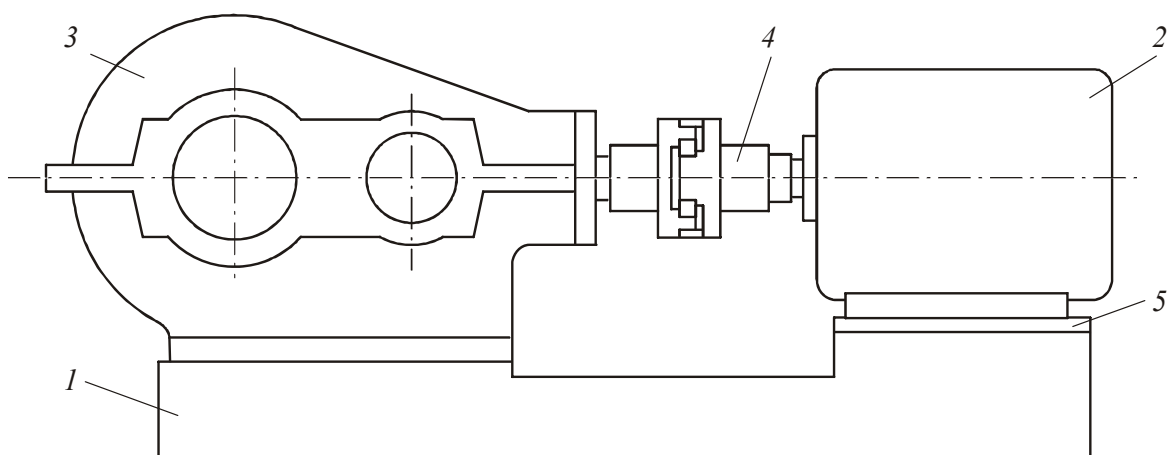


Рис. 4.1. Конструктивная схема изделия:

1 – плита; 2 – электродвигатель; 3 – редуктор; 4 – муфта; 5 – прокладка

Для уменьшения сил, действующих со стороны муфты на концы валов, в качестве общего допуска смещения примем величину, равную 70 % от смещения, которое позволяет компенсировать муфта, т. е.

$TA_{\Delta} = 0,7 \cdot 0,8 = 0,56$  (мм). Предположим, что допуск смещения осей валов в горизонтальной плоскости  $TA_{\Delta\Gamma} = 0,4$  мм. Тогда допуск смещения осей валов в вертикальной плоскости будет

$$TA_{\Delta B} = \sqrt{(TA_{\Delta})^2 - (TA_{\Delta\Gamma})^2} = \sqrt{(0,56)^2 - (0,40)^2} \approx 0,4 \text{ (мм)}.$$

Размерная цепь, определяющая смещение осей валов в вертикальной плоскости, показана на рис. 4.2. В этой цепи составляющие звенья  $A_1$  (расстояние от оси вала электродвигателя до его установочной плоскости) и  $A_4$  (расстояние от оси вала редуктора до его установочной плоскости) известны из стандартов на указанные изделия. Эти звенья составляют:  $A_1 = 160_{-0,5}$  мм и  $A_4 = 220_{-0,5}$  мм.

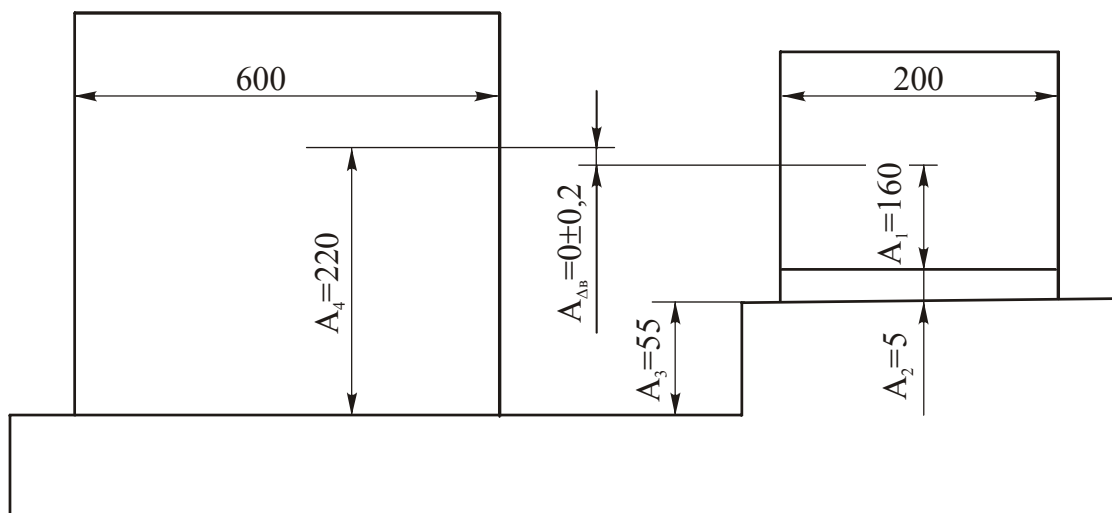


Рис. 4.2. Размерная цепь, определяющая смещение осей валов в вертикальной плоскости

Так как допуски каждого из этих звеньев превышают допуск замыкающего звена ( $TA_{\Delta B} = 0,4$  мм), то его обеспечение возможно либо методом пригонки, либо методом регулировки с использованием неподвижных компенсаторов. Предположим, что производство изделий является мелкосерийным. Тогда целесообразным методом обеспечения точности замыкающего звена  $TA_{\Delta B}$  будет метод пригонки с использованием в качестве компенсирующего звена прокладки под электродвигателем ( $A_2$ ).

В соответствии с методом пригонки на составляющие звенья  $A_2$  и  $A_3$  назначаем легко достижимые допуски (ИТ 11) и устанавливаем предельные отклонения  $A_2 = 5_{-0,075}$ ;  $A_3 = 55 \pm 0,095$  мм. При установлен-

ных допусках составляющих звеньев расширенный допуск замыкающего звена (используем метод максимума-минимума) составит:

$$T'A_{\Delta B} = TA_1 + TA_2 + TA_3 + TA_4 = 0,5 + 0,075 + 0,19 + 0,5 = 1,265 \text{ (мм)}.$$

Наибольшая возможная компенсация

$$\delta_k = T'A_{\Delta B} - TA_{\Delta B} = 1,265 - 0,4 = 0,865 \text{ (мм)}.$$

Для того чтобы компенсатор имел необходимую для пригонки толщину, в координату середины поля допуска звена  $A_2 = 5_{-0,075}$  нужно ввести поправку, определяемую по формуле

$$\Delta_k = 0,5\delta_k + \sum_{i=1}^{n+p} \Delta'_0 A_i - \Delta_0 A_{\Delta}.$$

Получим

$$\begin{aligned} \Delta_k &= 0,5\delta_k + \Delta'_0 A_4 - \Delta'_0 A_1 - \Delta'_0 A_2 - \Delta'_0 A_3 - \Delta_0 A_{\Delta B} = \\ &= 0,5 \cdot 0,865 - 0,25 - (-0,25) - (-0,0375) - 0 - 0 = 0,47 \text{ (мм)}. \end{aligned}$$

Таким образом, координата середины поля допуска звена  $A_2$

$$\Delta_0 A_2 = \Delta'_0 A_2 + \Delta_k = -0,0375 + 0,47 = 0,4325 \text{ (мм)}.$$

Размер компенсатора составит:

$$A_2 = 5,4325 \pm 0,0375 \text{ (мм)},$$

или

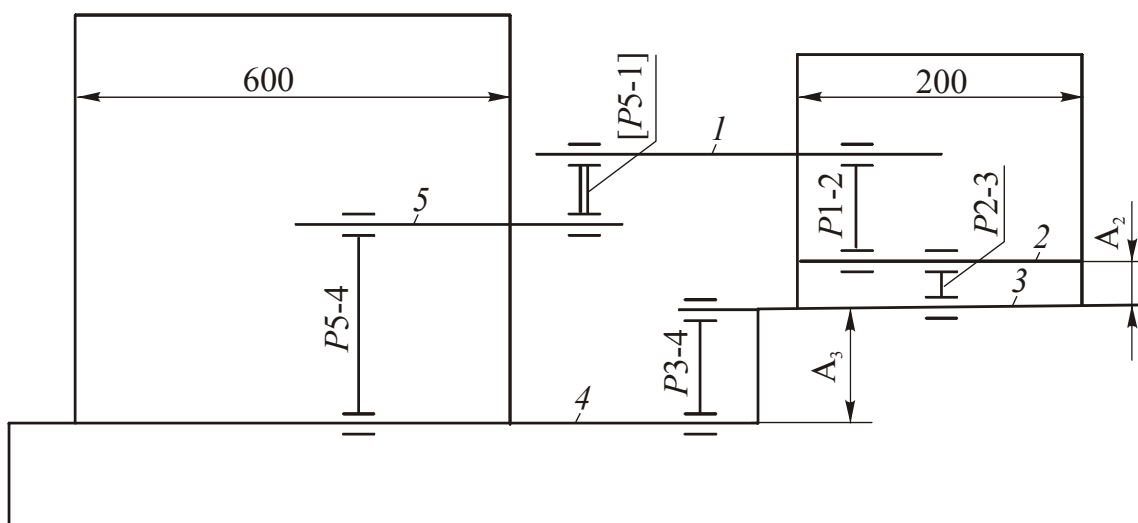
$$A_2 = 5,47_{-0,075} \text{ (мм)}.$$

Теперь рассмотрим вопрос обеспечения точности углового расположения валов в вертикальной плоскости. Размерная цепь, определяющая отклонение от параллельности осей валов в вертикальной плоскости, приведена на рис. 4.3. Как уже отмечалось, упругая муфта позволяет компенсировать отклонение от параллельности осей валов, равное  $2^\circ$ . Желая уменьшить нагрузки на валы, примем, что допуск отклонений их осей от параллельности составляет 70 % от этой величины, т. е.  $0,7 \cdot 2^\circ = 1,4^\circ$ . Длина дуги на радиусе 100 мм при этом угле равна  $1,4 \cdot 100 / 57 = 2,5$  (мм), т. е. общий допуск отклонений от параллельности осей валов  $T_{5-1}$  составляет 2,5 мм по длине  $l = 100$  мм. Предположим, что допуск отклонений от параллельности осей валов в горизонтальной плоскости  $T_{(5-1)г}$

(на  $l = 100$  мм) равен 1,2 мм. Тогда допуск отклонений осей валов от параллельности в вертикальной плоскости (на  $l = 100$  мм) будет

$$T_{(5-1)B} = \sqrt{T_{5-1}^2 - T_{(5-1)Г}^2} = \sqrt{(2,5)^2 - (1,2)^2} = 2,2 \text{ (мм)}.$$

По существующим стандартам допуск отклонений от параллельности оси вала электродвигателя относительно его установочной плоскости (на  $l = 100$  мм)  $T_{1-2} = 0,3$  мм, а допуск отклонений от параллельности оси вала редуктора относительно его установочной плоскости (на  $l = 100$  мм)  $T_{5-4} = 0,2$  мм.



*Рис. 4.3. Размерная цепь, определяющая отклонение от параллельности осей валов в вертикальной плоскости*

Примем, что допуск отклонений от параллельности плоскости 2 относительно плоскости 3 в пределах длины 200 мм равен допуску на размер  $A_2$  ( $TA_2 = 0,075$  мм), а допуск отклонений от параллельности плоскости 3 относительно плоскости 4 в пределах длины 600 мм – допуску на размер  $A_3$  ( $TA_3 = 0,19$  мм). Тогда допуски отклонений от параллельности (на  $l = 100$  мм) будут  $T_{2-3} = 0,0375$  мм;  $T_{3-4} = 0,0317$  мм.

Суммируя допуски отклонений от параллельности (на  $l = 100$  мм), получим

$$T_{[5-1]} = T_{1-2} + T_{2-3} + T_{3-4} + T_{5-4} = 0,3 + 0,0375 + 0,0317 + 0,2 = 0,57 \text{ (мм)}.$$

Полученное значение меньше допускового (2,2 мм). Следовательно, допуск отклонений от параллельности осей валов электродвигателя и редуктора в вертикальной плоскости будет обеспечиваться.



Подобным же образом решается вопрос обеспечения точности положения осей валов электродвигателя и редуктора в горизонтальной плоскости.

#### 4.2. Обеспечение точности положения деталей в сборочной единице

На рис. 4.4 [2] приведена конструктивная схема асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором и размерная цепь, определяющая зазор между правым подшипником и крышкой. Для нормальной работы электродвигателя величина этого зазора должна составлять  $A_{\Delta} = 0,1^{+0,4}$  мм.

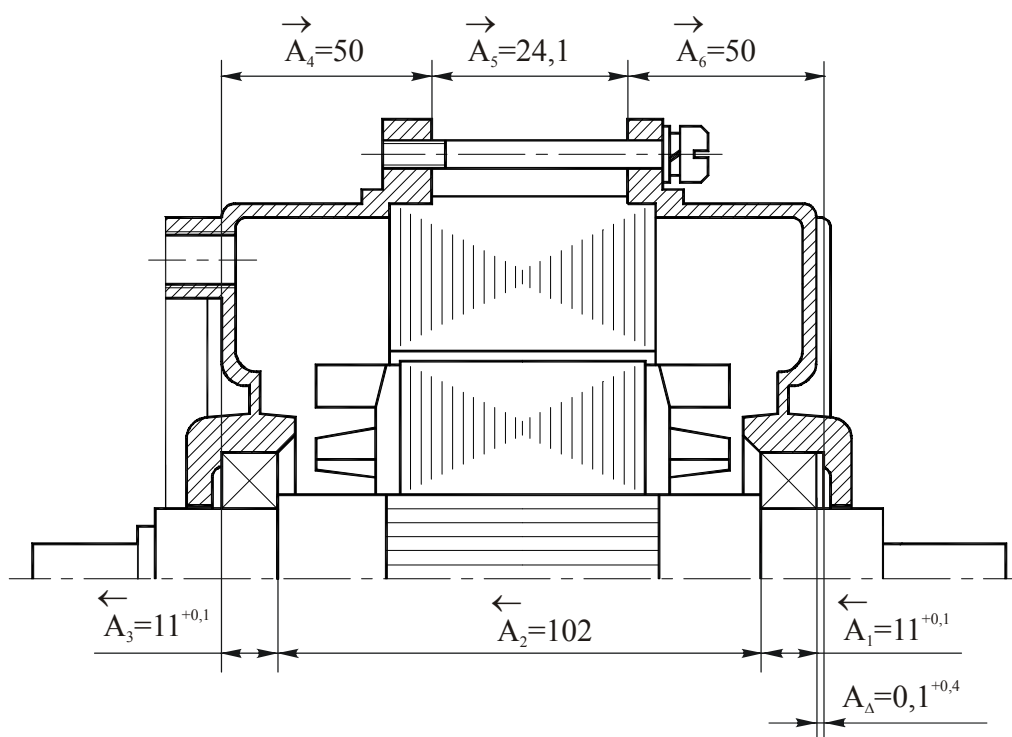


Рис. 4.4. Конструктивная схема и размерная цепь электродвигателя

Предположим, что производство электродвигателей является серийным. В соответствии с этим в качестве метода обеспечения точности замыкающего звена примем метод неполной взаимозаменяемости.

Будем считать, что распределение размеров составляющих звеньев в пределах допусков соответствует нормальному. Примем риск  $P$  выхода значений замыкающего звена за пределы его допуска равным 0,27 %. Этому риску соответствует коэффициент риска  $t_{\Delta} = 3$  (см. табл. 1.1). Коэффициент  $\lambda_i^2$  для нормального закона распределения составляет 1/9.

Найдем допуски и предельные отклонения составляющих звеньев размерной цепи. Ширина подшипников известна из стандартов ( $A_1 = A_3 = 11^{+0,1}$  мм). Таким образом, остается найти допуски и предельные отклонения звеньев  $A_2$ ,  $A_4$ ,  $A_5$  и  $A_6$ .

При указанных выше условиях уравнение (1.22), связывающее допуск замыкающего звена с допуском составляющих звеньев, принимает вид

$$TA_{\Delta} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n+p} (TA_i)^2}.$$

Для рассматриваемого примера оно переписывается следующим образом:

$$(TA_{\Delta})^2 = (TA_1)^2 + (TA_2)^2 + (TA_3)^2 + (TA_4)^2 + (TA_5)^2 + (TA_6)^2.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} (TA_2)^2 + (TA_4)^2 + (TA_5)^2 + (TA_6)^2 &= (TA_{\Delta})^2 - (TA_1)^2 - (TA_3)^2 = \\ &= (0,4)^2 + (0,1)^2 + (0,1)^2 = 0,14 \text{ (мм}^2\text{)}. \end{aligned}$$

По этому соотношению подбором находим допуски составляющих звеньев  $A_2$ ,  $A_4$ ,  $A_5$  и  $A_6$ . Получаем:  $TA_2 = 0,2$  мм;  $TA_4 = TA_5 = TA_6 = 0,18$  мм.

Правильность установленных допусков составляющих звеньев проверяем по формуле

$$TA_{\Delta} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n+p} (TA_i)^2} = \sqrt{2 \cdot (0,1)^2 + 3 \cdot (0,18)^2 + (0,2)^2} \approx 0,4 \text{ мм.}$$

Следовательно, допуски установлены верно.

Далее на звенья  $A_2$ ,  $A_4$  и  $A_6$  назначаем предельные отклонения. Получаем:  $A_2 = 102_{-0,2}$  мм;  $A_4 = A_6 = 50 \pm 0,09$  мм. Предельное отклонение звена  $A_5$  находим, определив из уравнения (1.16) координату середины поля допуска этого звена. Уравнение (1.16) в данном случае запишется так:

$$\Delta_0 A_{\Delta} = \Delta_0 A_4 + \Delta_0 A_5 + \Delta_0 A_6 - \Delta_0 A_1 - \Delta_0 A_2 - \Delta_0 A_3.$$

Отсюда

$$\begin{aligned}\Delta_0 A_5 &= \Delta_0 A_\Delta + \Delta_0 A_1 + \Delta_0 A_2 - \Delta_0 A_3 - \Delta_0 A_4 - \Delta_0 A_6 = \\ &= 0,2 + 0,05 - 0,1 + 0,05 - 0 - 0 = 0,2 \text{ (мм)}.\end{aligned}$$

Предельные отклонения звена  $A_5$  составят:

$$\begin{aligned}\Delta_B A_5 &= \Delta_0 A_5 + \frac{TA_5}{2} = 0,2 + \frac{0,18}{2} = 0,29 \text{ (мм)}; \\ \Delta_H A_5 &= \Delta_0 A_5 - \frac{TA_5}{2} = 0,2 - \frac{0,18}{2} = 0,11 \text{ (мм)}.\end{aligned}$$

Таким образом, получим  $A_5 = 24,1_{+0,11}^{+0,29}$  мм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
2. Гольдшмидт М.Г. Методология конструирования: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 160 с.
3. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Расчет допусков размеров. – М.: Машиностроение, 2001. – 304 с.
4. Колесов И.М. Основы технологии машиностроения: учебник для машиностроительных специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1999. – 591 с.
5. Размерный анализ технологических процессов / В.В. Матвеев, М.М. Тверской, Ф.И. Бойков и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 264 с.
6. Солонин И.С., Солонин С.И. Расчет сборочных и технологических размерных цепей. – М.: Машиностроение, 1980. – 110 с.
7. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 944 с.
8. Стрелец А.А., Фирсов В.А. Размерные расчеты в задачах оптимизации конструкторско-технологических решений. – М.: Машиностроение, 1988. – 120 с.
9. Цепи размерные. Основные понятия, методы расчета линейных и угловых цепей: РД 50-635-87 / И.М. Колесов, Е.И. Луцков, А.И. Кубарев и др. Ввод в действие с 1.07.88. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 45 с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Числовые значения допусков (начало)

Интервал номинальных размеров, мм	Квалитет												
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Св.													
До													
		мкм											
3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60
6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75
10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90
18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110
30	0,5	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130
50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160
80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190
120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220
180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250
250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290
315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320
400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360
500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400
630	4,5	6	9	11	16	22	30	44	70	110	175	280	440
800	5	7	10	13	18	25	35	50	80	125	200	320	500
1000	5,5	8	11	15	21	29	40	56	90	140	230	360	560
1250	6,5	9	13	18	24	34	46	66	105	165	260	420	660
1600	8	11	15	21	29	40	54	78	125	195	310	500	780
2000	9	13	18	25	35	48	65	92	150	230	370	600	920
2500	11	15	22	30	41	57	77	110	175	280	440	700	1100
3150	13	18	26	36	50	69	93	135	210	330	540	860	1350

Числовые значения допусков (окончание)

Интервал номинальных размеров, мм		Квалитет											
		12	13	14	15	16	17	18					
Св.	До	мм											
	3	0,10	0,14	0,25	0,40	0,60	1,00	1,40					
	6	0,12	0,18	0,30	0,48	0,75	1,20	1,80					
	10	0,15	0,22	0,36	0,58	0,90	1,50	2,20					
	18	0,18	0,27	0,43	0,70	1,10	1,80	2,70					
	30	0,21	0,33	0,52	0,84	1,30	2,10	3,30					
	50	0,25	0,39	0,62	1,00	1,60	2,50	3,90					
	80	0,30	0,46	0,74	1,20	1,90	3,00	4,60					
	120	0,35	0,54	0,87	1,40	2,20	3,50	5,40					
	180	0,40	0,63	1,00	1,60	2,50	4,00	6,30					
	250	0,46	0,72	1,15	1,85	2,90	4,60	7,20					
	315	0,52	0,81	1,30	2,10	3,20	5,20	8,10					
	400	0,57	0,89	1,40	2,30	3,60	5,70	8,90					
	500	0,63	0,97	1,55	2,50	4,00	6,30	9,70					
	630	0,70	1,10	1,75	2,80	4,40	7,00	11,00					
	800	0,80	1,25	2,00	3,20	5,00	8,00	12,50					
	1000	0,90	1,40	2,30	3,60	5,60	9,00	14,00					
	1250	1,05	1,65	2,60	4,20	6,60	10,50	16,50					
	1600	1,25	1,95	3,10	5,00	7,80	12,50	19,50					
	2000	1,50	2,30	3,70	6,00	9,20	15,00	23,00					
	2500	1,75	2,80	4,40	7,00	11,00	17,50	28,00					
	3150	2,10	3,30	5,40	8,60	13,50	21,00	33,00					

Примечание. Для размеров менее 1 мм квалитеты от 14 до 18 не применяются.

Допуски параллельности, наклона, торцового биения и полного торцового биения (по ГОСТ 24643–83)

Номинальный размер, мм	Степень точности															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Св.	мм															
До	мкм															
10	0,4	0,6	1	1,6	2,5	4	6	10	16	25	40	60	0,1	0,16	0,25	0,4
16	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	80	0,12	0,2	0,3	0,5
16	0,6	1	1,6	2,5	4	6	10	16	25	40	60	100	0,16	0,25	0,4	0,6
25	0,8	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	80	120	0,2	0,3	0,5	0,8
40	1	1,6	2,5	4	6	10	16	25	40	60	100	160	0,25	0,4	0,6	1
63	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	80	120	200	0,3	0,5	0,8	1,2
100	1,6	2,5	4	6	10	16	25	40	60	100	160	250	0,4	0,6	1	1,6
160	2	3	5	8	12	20	30	50	80	120	200	300	0,5	0,8	1,2	2
250	2,5	4	6	10	16	25	40	60	100	160	250	400	0,6	1	1,6	2,5
400	3	5	8	12	20	30	50	80	120	200	300	500	0,8	1,2	2	3
630	4	6	10	16	25	40	60	100	160	250	400	600	1	1,6	2,5	4
1000	5	3	12	20	30	50	80	120	200	300	500	800	1,2	2	3	5
1600	6	10	16	25	40	60	100	160	250	400	600	1000	1,6	2,5	4	6
2800	8	12	20	30	50	80	120	200	300	500	800	1200	2	3	5	8
4000	10	16	25	40	60	100	160	250	400	600	1000	1600	2,5	4	6	10
6300	12	20	30	50	80	120	200	300	500	800	1200	2000	3	5	8	12
Ближайшая степень точности по ГОСТ 10356–63																
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	--	--	--	--	--

Примечания: 1. По данной таблице назначаются также суммарные допуски параллельности и плоскостности, перпендикулярности и плоскостности, наклона и плоскостности. 2. Выбор допуска при данной степени точности производится по длине нормируемой поверхности (если допуск относится ко всей длине) или длине нормируемого участка. Допуски торцового или полного торцового биения определяются по наибольшему диаметру торцовой поверхности или диаметру, на котором дается допуск торцового биения.

Допуски соосности, симметричности, пересечения осей и радиального биения (по ГОСТ 24643–81)

Номинальный диаметр, мм	Степень точности															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Св.	Допуск, мкм															
До																
3	0,8	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	80	120	200	300	500	800
10	1	1,6	2,5	4	6	10	16	25	40	60	100	160	250	400	600	1000
18	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	80	120	200	300	500	800	1200
30	1,6	2,5	4	6	10	16	25	40	60	100	160	250	400	600	1000	1600
50	2	3	5	8	12	20	30	50	80	120	200	300	500	800	1200	2000
120	2,5	4	6	10	16	25	40	60	100	160	250	400	600	1000	1600	2500
250	3	5	8	12	20	30	50	80	120	200	300	500	800	1200	2000	3000
400	4	6	10	16	25	40	60	100	160	250	400	600	1000	1600	2500	4000
630	5	8	12	20	30	50	80	120	200	300	500	800	1200	2000	3000	5000
1000	6	10	16	25	40	60	100	160	250	400	600	1000	1600	2500	4000	6000
1600	8	12	20	30	50	80	120	200	300	500	800	1200	2000	3000	5000	8000
	10	16	25	40	60	100	160	250	400	600	1000	1600	2500	4000	6000	10000
Ближайшая степень точности по ГОСТ 10356–63																
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	--	--	--	--	--	--

Примечания: 1. Допуски, приведенные в данной таблице, распространяются также на концентричность, полное радиальное биение и биение в заданном направлении. 2. Допуски соосности, симметричности и пересечения осей приведены в таблице в диаметральном выражении. Соответствующие им допуски в радиусном выражении могут быть получены делением их значений пополам. 3. Выбор допусков при данной степени точности производится по диаметру нормируемой поверхности или размеру между поверхностями, образующими нормируемый симметричный элемент. Если база не указывается, то допуск определяется по элементу с большим размером.



## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

*Значения функции Лапласа*

$$2\Phi(t) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt \text{ и } \Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

(начало)

<i>t</i>	2Φ( <i>t</i> )	Φ( <i>t</i> )
0,00	0,0000	0,000
0,01	0,0080	0,004
0,02	0,0160	0,008
0,03	0,0239	0,012
0,04	0,0319	0,016
0,05	0,0399	0,020
0,06	0,0478	0,024
0,07	0,0558	0,028
0,08	0,0638	0,032
0,09	0,0717	0,036
0,10	0,0797	0,040
0,11	0,0876	0,044
0,12	0,0955	0,048
0,13	0,1034	0,0515
0,14	0,1113	0,0555
0,15	0,1192	0,0595
0,16	0,1271	0,0635
0,17	0,1350	0,0675
0,18	0,1428	0,0715
0,19	0,1507	0,0755
0,20	0,1585	0,0795
0,21	0,1663	0,0830
0,22	0,1741	0,0870
0,23	0,1810	0,0910
0,24	0,1897	0,0950
0,25	0,1974	0,0985
0,26	0,2051	0,1025
0,27	0,2128	0,1065

<i>t</i>	2Φ( <i>t</i> )	Φ( <i>t</i> )
0,28	0,2205	0,1105
0,29	0,2282	0,1140
0,30	0,2358	0,1180
0,31	0,2434	0,1215
0,32	0,2510	0,1255
0,33	0,2586	0,1295
0,34	0,2661	0,1330
0,35	0,2737	0,1370
0,36	0,2812	0,1405
0,37	0,2886	0,1445
0,38	0,2961	0,1480
0,39	0,3035	0,1515
0,40	0,3108	0,1555
0,41	0,3182	0,1590
0,42	0,3255	0,1630
0,43	0,3328	0,1665
0,44	0,3401	0,1700
0,45	0,3473	0,1735
0,46	0,3545	0,1770
0,47	0,3616	0,1810
0,48	0,3688	0,1845
0,49	0,3759	0,1880
0,50	0,3829	0,1915
0,51	0,3899	0,1950
0,52	0,3969	0,1985
0,53	0,4039	0,2020
0,54	0,4108	0,2055
0,55	0,4177	0,2090

*Значения функции Лапласа (продолжение)*

$t$	$2\Phi(t)$	$\Phi(t)$
0,56	0,4245	0,2125
0,57	0,4313	0,2155
0,58	0,4381	0,2190
0,59	0,4448	0,2225
0,64	0,4778	0,2390
0,65	0,4843	0,2420
0,66	0,4907	0,2455
0,67	0,4971	0,2485
0,68	0,5035	0,2520
0,69	0,5098	0,2550
0,70	0,5161	0,2580
0,71	0,5223	0,2610
0,72	0,5285	0,2640
0,73	0,5346	0,2675
0,74	0,5407	0,2705
0,75	0,5467	0,2735
0,76	0,5527	0,2765
0,77	0,5587	0,2795
0,78	0,5646	0,2825
0,79	0,5705	0,2850
0,80	0,5763	0,2880
0,81	0,5821	0,2910
0,82	0,5878	0,2940
0,83	0,5935	0,2965
0,84	0,5991	0,2995
0,85	0,6047	0,3025
0,86	0,6102	0,3050
0,87	0,6157	0,3080
0,88	0,6211	0,3105
0,89	0,6265	0,3135
0,90	0,6319	0,3160
0,91	0,6372	0,3180
0,92	0,6424	0,3210
0,93	0,6476	0,3240
0,94	0,6528	0,3265
0,95	0,6579	0,3290

$t$	$2\Phi(t)$	$\Phi(t)$
0,96	0,6629	0,3315
0,97	0,6680	0,3340
0,98	0,6729	0,3365
0,99	0,6778	0,3390
1,00	0,6827	0,3415
1,01	0,6875	0,3440
1,02	0,6923	0,3460
1,03	0,6970	0,3485
1,04	0,7017	0,3510
1,05	0,7063	0,3530
1,06	0,7109	0,3555
1,07	0,7154	0,3575
1,08	0,7199	0,3600
1,09	0,7243	0,3620
1,10	0,7287	0,3645
1,11	0,7330	0,3665
1,12	0,7373	0,3685
1,13	0,7415	0,3710
1,14	0,7457	0,3730
1,15	0,7499	0,3740
1,16	0,7540	0,3770
1,17	0,7580	0,3790
1,18	0,7620	0,3810
1,19	0,7660	0,3830
1,20	0,7699	0,3850
1,21	0,7737	0,3870
1,22	0,7775	0,3890
1,23	0,7813	0,3905
1,24	0,7850	0,3925
1,25	0,7887	0,3945
1,26	0,7923	0,3960
1,27	0,7959	0,3980
1,28	0,7995	0,4000
1,29	0,8030	0,4015
1,30	0,8064	0,4030
1,31	0,8098	0,4050

*Значения функции Лапласа (продолжение)*

$t$	$2\Phi(t)$	$\Phi(t)$
1,32	0,8132	0,4065
1,33	0,8165	0,4080
1,34	0,8197	0,4100
1,35	0,8230	0,4115
1,36	0,8262	0,4130
1,37	0,8293	0,4145
1,38	0,8324	0,4160
1,39	0,8355	0,4175
1,40	0,8385	0,4190
1,41	0,8415	0,4205
1,42	0,8444	0,4220
1,43	0,8473	0,4235
1,44	0,8501	0,4250
1,45	0,8529	0,4265
1,46	0,8557	0,4280
1,47	0,8584	0,4290
1,48	0,8611	0,4305
1,49	0,8638	0,4320
1,50	0,8664	0,4330
1,51	0,8690	0,4335
1,52	0,8715	0,4355
1,53	0,8740	0,4370
1,54	0,8764	0,4390
1,55	0,8789	0,4395
1,56	0,8812	0,4405
1,57	0,8836	0,4420
1,58	0,8859	0,4430
1,59	0,8882	0,4440
1,60	0,8904	0,4450
1,61	0,8926	0,4465
1,62	0,8948	0,4475
1,63	0,8969	0,4485
1,64	0,8990	0,4495
1,65	0,9011	0,4505
1,66	0,9031	0,4515
1,67	0,9041	0,4526

$t$	$2\Phi(t)$	$\Phi(t)$
1,68	0,9070	0,4535
1,69	0,9090	0,4545
1,70	0,9109	0,4555
1,71	0,9127	0,4565
1,72	0,9146	0,4575
1,73	0,9164	0,4580
1,74	0,9181	0,4590
1,75	0,9199	0,4600
1,76	0,9216	0,4610
1,77	0,9233	0,4615
1,78	0,9249	0,4625
1,79	0,9265	0,4635
1,80	0,9281	0,4640
1,81	0,9297	0,4650
1,82	0,9312	0,4655
1,83	0,9328	0,4665
1,84	0,9342	0,4670
1,85	0,9357	0,4680
1,86	0,9371	0,4685
1,87	0,9385	0,4695
1,88	0,9399	0,4700
1,89	0,9412	0,4705
1,90	0,9426	0,4715
1,91	0,9439	0,4720
1,92	0,9451	0,4725
1,93	0,9464	0,4730
1,94	0,9476	0,4740
1,95	0,9498	0,4745
1,96	0,9500	0,4750
1,97	0,9512	0,4755
1,98	0,9523	0,4760
1,99	0,9534	0,4765
2,00	0,9545	0,4775
2,01	0,9560	0,4780
2,02	0,9566	0,4785
2,03	0,9580	0,4790

*Значения функции Лапласа (продолжение)*

$t$	$2\Phi(t)$	$\Phi(t)$
2,04	0,9587	0,4795
2,05	0,9600	0,4800
2,06	0,9606	0,4805
2,07	0,9620	0,4810
2,08	0,9625	0,4810
2,09	0,9630	0,4815
2,10	0,9643	0,4820
2,11	0,9650	0,4825
2,12	0,9660	0,4830
2,13	0,9670	0,4835
2,14	0,9676	0,4840
2,15	0,9680	0,4840
2,16	0,9692	0,4845
2,17	0,9700	0,4850
2,18	0,9707	0,4855
2,19	0,9710	0,4855
2,20	0,9722	0,4860
2,21	0,9730	0,4865
2,22	0,9736	0,4870
2,23	0,9740	0,4870
2,24	0,9749	0,4875
2,25	0,9760	0,4880
2,26	0,9762	0,4880
2,27	0,9770	0,4885
2,28	0,9774	0,4885
2,29	0,9780	0,4890
2,30	0,9786	0,4895
2,31	0,9790	0,4895
2,32	0,9797	0,4900
2,33	0,9800	0,4900
2,34	0,9807	0,4905
2,35	0,9810	0,4905
2,36	0,9817	0,4910
2,37	0,9820	0,4910
2,38	0,9827	0,4915
2,39	0,9830	0,4915

$t$	$2\Phi(t)$	$\Phi(t)$
2,40	0,9836	0,4920
2,41	0,9840	0,4920
2,42	0,9845	0,4920
2,43	0,9850	0,4925
2,44	0,9853	0,4925
2,45	0,9860	0,4930
2,46	0,9861	0,4930
2,47	0,9861	0,4930
2,48	0,9869	0,4935
2,49	0,9870	0,4935
2,50	0,9876	0,4940
2,51	0,9880	0,4940
2,52	0,9883	0,4940
2,53	0,9889	0,4945
2,54	0,9889	0,4945
2,55	0,9889	0,4945
2,56	0,9895	0,4950
2,57	0,9895	0,4950
2,58	0,9901	0,4950
2,59	0,9901	0,4950
2,60	0,9907	0,4955
2,61	0,9907	0,4955
2,62	0,9912	0,4955
2,63	0,9912	0,4955
2,64	0,9917	0,4960
2,65	0,9917	0,4960
2,66	0,9922	0,4960
2,67	0,9922	0,4960
2,68	0,9926	0,4965
2,69	0,9926	0,4965
2,70	0,9931	0,4965
2,71	0,9931	0,4965
2,72	0,9935	0,4965
2,73	0,9935	0,4965
2,74	0,9939	0,4970
2,75	0,9939	0,4970

*Значения функции Лапласа (окончание)*

$t$	$2\Phi(t)$	$\Phi(t)$
2,76	0,9942	0,4970
2,77	0,9942	0,4970
2,78	0,9946	0,4975
2,79	0,9946	0,4975
2,80	0,9949	0,4975
2,81	0,9949	0,4975
2,82	0,9952	0,4975
2,83	0,9952	0,4975
2,84	0,9955	0,4975
2,85	0,9955	0,4975
2,86	0,9958	0,4980
2,87	0,9958	0,4980
2,88	0,9960	0,4980
2,89	0,9960	0,4980
2,90	0,9962	0,4980,
2,91	0,9962	0,4980
2,92	0,9965	0,4980
2,93	0,9965	0,4980

$t$	$2\Phi(t)$	$\Phi(t)$
2,94	0,9967	0,4985
2,95	0,9967	0,4985
2,96	0,9969	0,4985
2,97	0,9969	0,4985
2,98	0,9971	0,4985
2,99	0,9971	0,4985
3,00	0,9973	0,4986
3,10	0,9973	0,4986
3,20	0,9986	0,4993
3,20	0,9986	0,4993
3,30	0,9990	0,4995
3,40	0,9993	0,4996
3,50	0,9995	0,4997
3,60	0,9997	0,4998
3,70	0,9998	0,4999
3,80	0,9999	0,4999
4,00	0,99995	0,4999
5,00	0,99999	0,49999

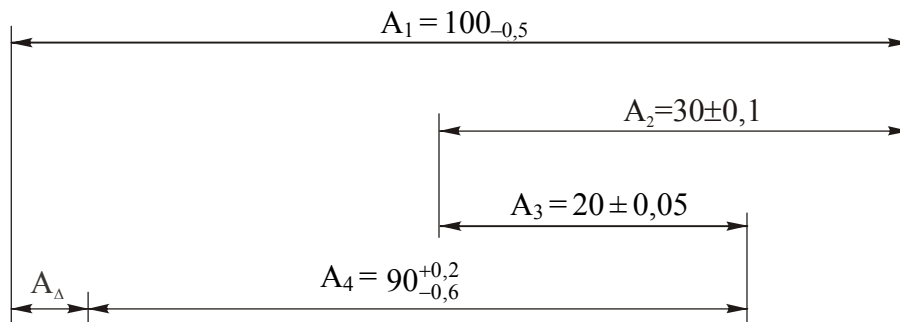
## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### ЗАДАЧИ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

#### Задача № 1

По заданной схеме определить знаки составляющих звеньев, записать уравнение размерной цепи и найти номинальное значение и предельные отклонения замыкающего звена  $A_{\Delta}$  :

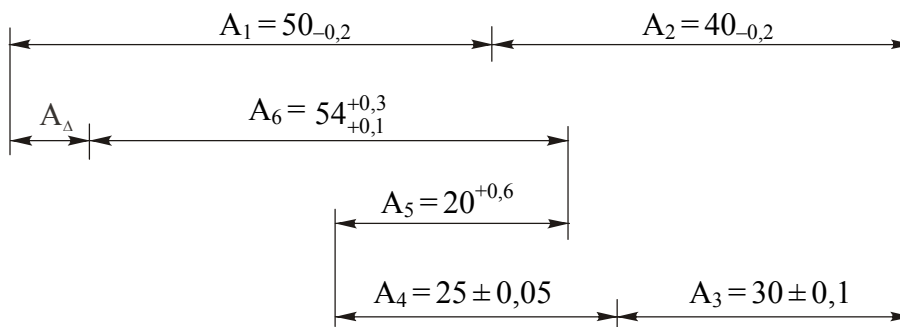
- методом максимума-минимума;
- вероятностным методом (при риске  $P=1\%$  и нормальном распределении размеров составляющих звеньев).



#### Задача № 2

По заданной схеме определить знаки составляющих звеньев, записать уравнение размерной цепи и найти номинальное значение и предельные отклонения замыкающего звена  $A_{\Delta}$  :

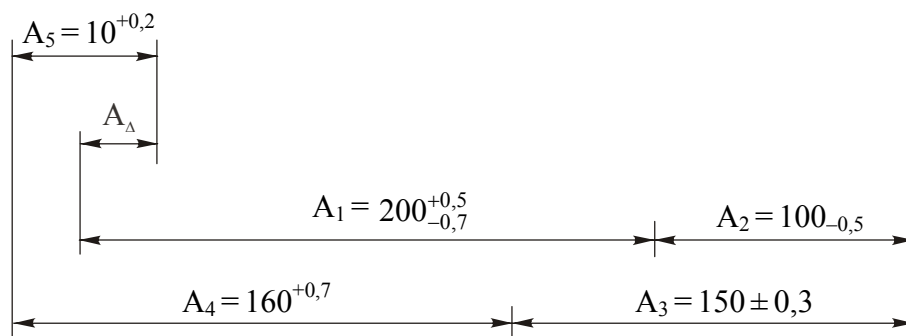
- методом максимума-минимума;
- вероятностным методом (при риске  $P = 2\%$  и распределении размеров составляющих звеньев по закону равной вероятности).



### Задача № 3

По заданной схеме определить знаки составляющих звеньев, записать уравнение размерной цепи и найти номинальное значение и предельные отклонения замыкающего звена  $A_{\Delta}$ :

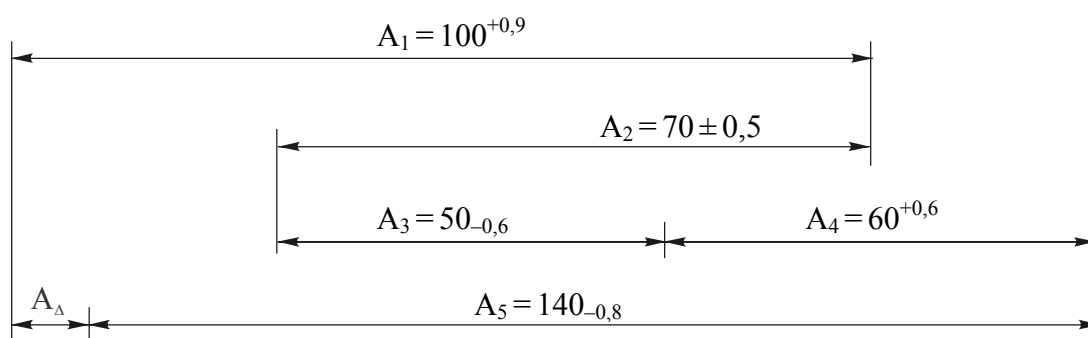
- методом максимума-минимума;
- вероятностным методом (при риске  $P=0,27\%$  и распределении размеров составляющих звеньев по закону Симпсона).



### Задача № 4

По заданной схеме определить знаки составляющих звеньев, записать уравнение размерной цепи и найти номинальное значение и предельные отклонения замыкающего звена  $A_{\Delta}$ :

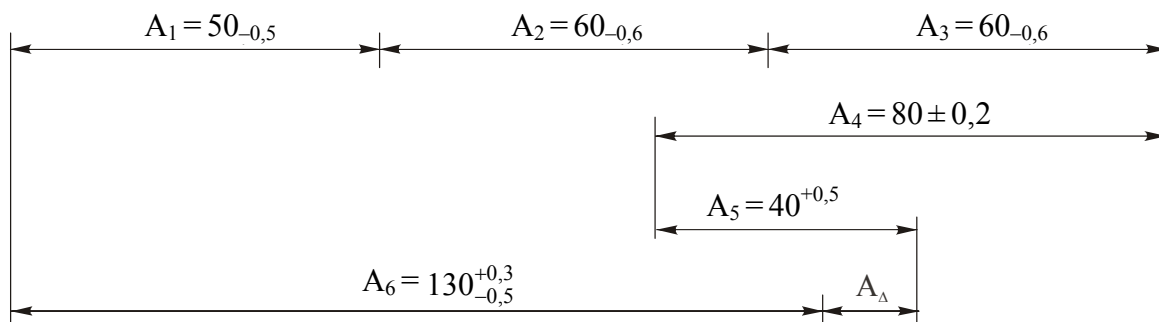
- методом максимума-минимума;
- вероятностным методом (при риске  $P=0,27\%$  и распределении размеров составляющих звеньев по закону равной вероятности).



### Задача № 5

По заданной схеме определить знаки составляющих звеньев, записать уравнение размерной цепи и найти номинальное значение и предельные отклонения замыкающего звена  $A_{\Delta}$ :

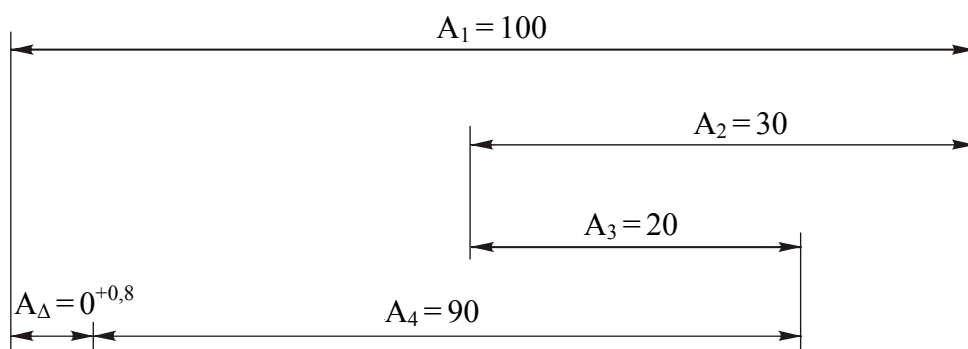
- методом максимума-минимума;
- вероятностным методом (при риске  $P = 0,27\%$  и нормальном распределении размеров составляющих звеньев).



### Задача № 6

Для заданной размерной цепи по допуску и предельным отклонениям замыкающего звена  $A_{\Delta}$  найти допуски и предельные отклонения составляющих звеньев (допуски принять одинаковыми):

- методом максимума-минимума;
- вероятностным методом (при риске  $P = 1\%$  и нормальном распределении размеров составляющих звеньев).

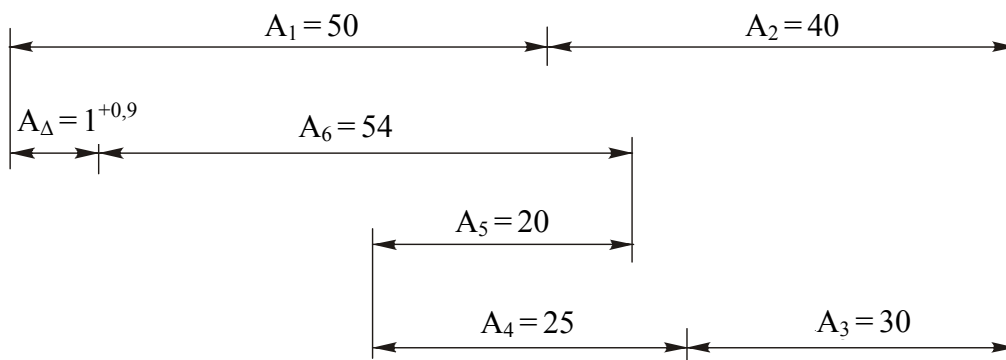




### Задача № 7

Для заданной размерной цепи по допуску и предельным отклонениям замыкающего звена  $A_{\Delta}$  найти допуски и предельные отклонения составляющих звеньев (допуски принять одинаковыми):

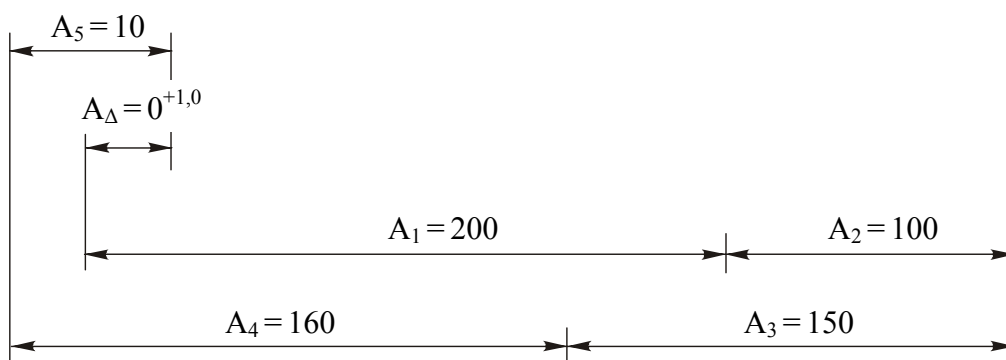
- методом максимума-минимума;
- вероятностным методом (при риске  $P = 2\%$  и распределении размеров составляющих звеньев по закону равной вероятности).



### Задача № 8

Для заданной размерной цепи по допуску и предельным отклонениям замыкающего звена  $A_{\Delta}$  найти допуски и предельные отклонения составляющих звеньев (допуски принять одинаковыми):

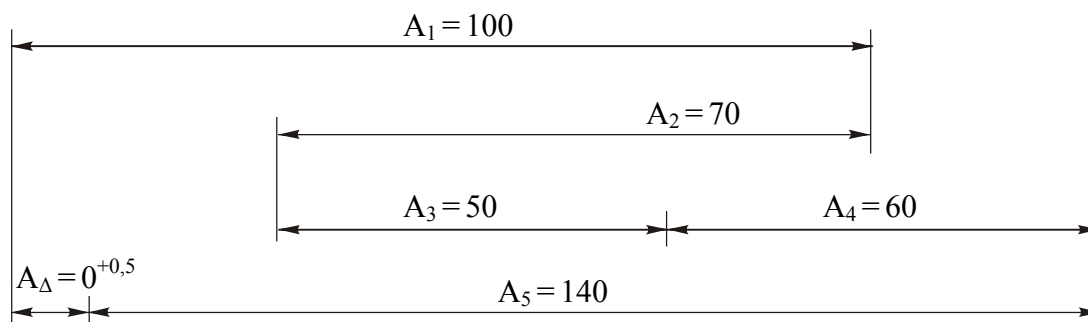
- методом максимума-минимума;
- вероятностным методом (при риске  $P = 0,27\%$  и распределении размеров составляющих звеньев по закону Симпсона).



### Задача № 9

Для заданной размерной цепи по допуску и предельным отклонениям замыкающего звена  $A_{\Delta}$  найти допуски и предельные отклонения составляющих звеньев (допуски принять одинаковыми):

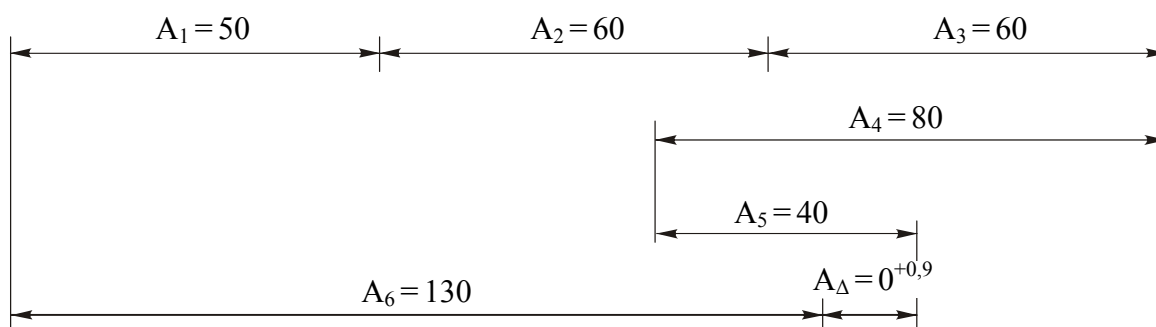
- методом максимума-минимума;
- вероятностным методом (при риске  $P = 0,27\%$  и распределении размеров составляющих звеньев по закону равной вероятности).



### Задача № 10

Для заданной размерной цепи по допуску и предельным отклонениям замыкающего звена  $A_{\Delta}$  найти допуски и предельные отклонения составляющих звеньев (допуски принять одинаковыми):

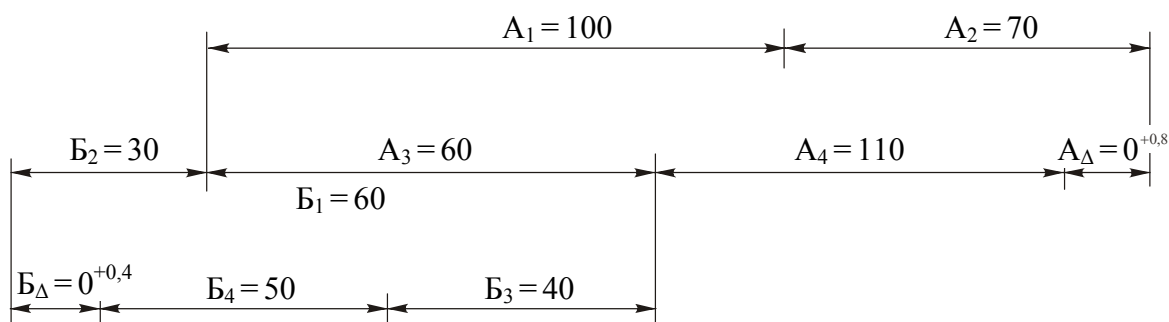
- методом максимума-минимума;
- вероятностным методом (при риске  $P = 0,27\%$  и нормальном распределении размеров составляющих звеньев).



### Задача № 11

Для заданных параллельно связанных размерных цепей А и Б по допускам и предельным отклонениям замыкающих звеньев найти допуски и предельные отклонения составляющих звеньев. Допуски замыкающих звеньев распределить между допусками составляющих звеньев произвольно.

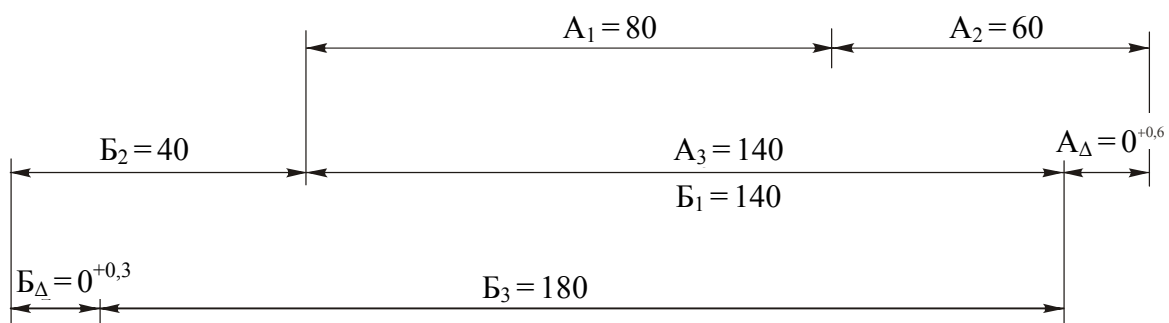
Задачу решить вероятностным методом в предположении о нормальном распределении составляющих звеньев и риске  $P = 0,27\%$ .



### Задача № 12

Для заданных параллельно связанных размерных цепей А и Б по допускам и предельным отклонениям замыкающих звеньев найти допуски и предельные отклонения составляющих звеньев. Допуски замыкающих звеньев распределить между допусками составляющих звеньев произвольно.

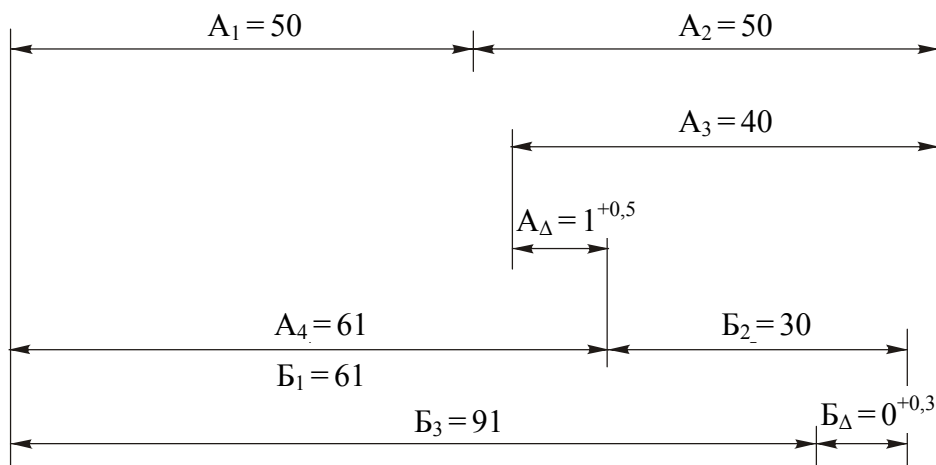
Задачу решить вероятностным методом в предположении о нормальном распределении составляющих звеньев и риске  $P = 1\%$ .



### Задача № 13

Для заданных параллельно связанных размерных цепей А и Б по допускам и предельным отклонениям замыкающих звеньев найти допуски и предельные отклонения составляющих звеньев. Допуски замыкающих звеньев распределить между допусками составляющих звеньев произвольно.

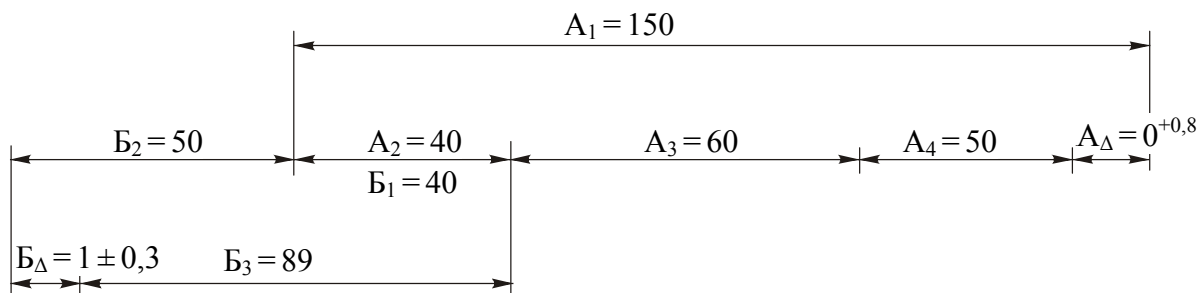
Задачу решить вероятностным методом в предположении о распределении размеров составляющих звеньев по закону Симпсона и риске  $P = 0,27 \%$ .



### Задача № 14

Для заданных параллельно связанных размерных цепей А и Б по допускам и предельным отклонениям замыкающих звеньев найти допуски и предельные отклонения составляющих звеньев. Допуски замыкающих звеньев распределить между допусками составляющих звеньев произвольно.

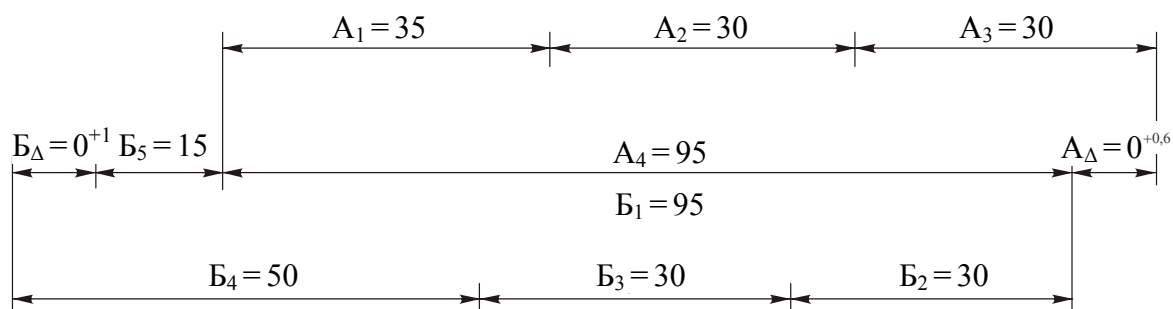
Задачу решить вероятностным методом в предположении о распределении размеров составляющих звеньев по закону равной вероятности и риске  $P = 0,27 \%$ .



### Задача № 15

Для заданных параллельно связанных размерных цепей А и Б по допускам и предельным отклонениям замыкающих звеньев найти допуски и предельные отклонения составляющих звеньев. Допуски замыкающих звеньев распределить между допусками составляющих звеньев произвольно.

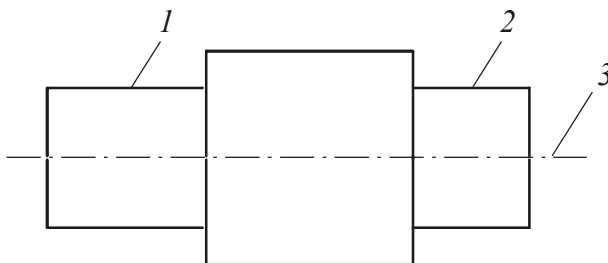
Задачу решить вероятностным методом в предположении о распределении размеров составляющих звеньев по закону равной вероятности и риске  $P = 1 \%$ .



### Задача № 16

Для показанной на рисунке детали (валика) установлено техническое требование: допуск соосности шеек 1 и 2 относительно оси 3 центровых отверстий  $0,01$  мм. Необходимо построить размерную цепь и определить отклонение от соосности шейки 1 относительно шейки 2.

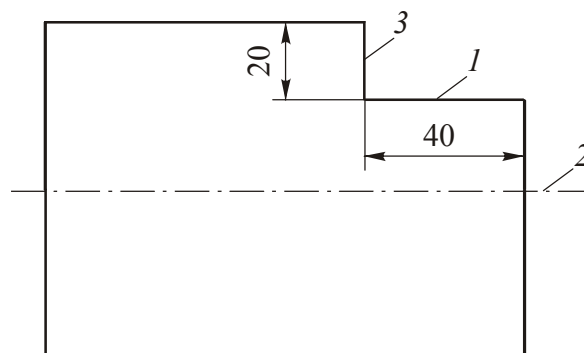
Задачу решить вероятностным методом в предположении о распределении отклонений от соосности по закону Симпсона и риске  $P = 1 \%$ .



### Задача № 17

Для показанной на рисунке детали установлены технические требования: допуск параллельности плоскости 1 относительно оси 2 центров отверстий – 0,02 мм; допуск перпендикулярности плоскости 3 относительно плоскости 1 – 0,01 мм. Необходимо построить размерную цепь и определить отклонение от перпендикулярности плоскости 3 относительно оси 2 центров отверстий.

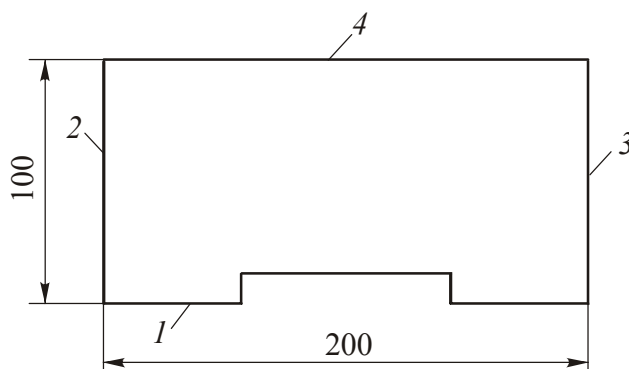
Задачу решить двумя методами: максимума-минимума и вероятностным в предположении о распределении отклонений расположения по закону равной вероятности и риске  $P = 1 \%$ .



### Задача № 18

Для показанной на рисунке детали установлены технические требования: допуски перпендикулярности плоскостей 2 и 3 относительно плоскости 1 – 0,03 мм; допуск параллельности плоскости 4 относительно плоскости 1 – 0,02 мм. Необходимо построить размерную цепь и определить отклонения от перпендикулярности плоскости 4 относительно плоскостей 2 и 3.

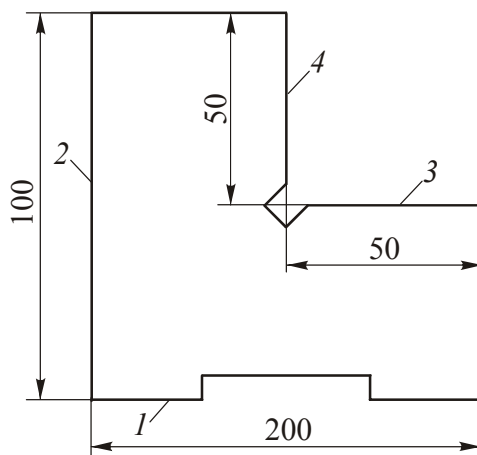
Задачу решить двумя методами: максимума-минимума и вероятностным в предположении о распределении отклонений расположения по закону Симпсона и риске  $P = 1 \%$ .



### Задача № 19

Для показанной на рисунке детали установлены технические требования: допуск перпендикулярности плоскости 2 относительно плоскости 1 – 0,01 мм; допуски параллельности плоскости 3 относительно плоскости 1 и плоскости 4 относительно плоскости 2 – 0,005 мм. Необходимо построить размерную цепь и определить отклонения от перпендикулярности плоскости 4 относительно плоскости 3.

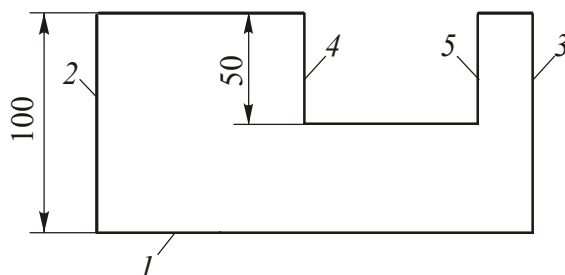
Задачу решить двумя методами: максимума-минимума и вероятностным в предположении о распределении отклонений расположения по нормальному закону и риске  $P = 1 \%$ .



### Задача № 20

Для показанной на рисунке детали установлены технические требования: допуски перпендикулярности плоскостей 2 и 3 относительно плоскости 1 – 0,02 мм; допуски параллельности плоскости 4 относительно плоскости 2 и плоскости 5 относительно плоскости 3 – 0,01 мм. Необходимо построить размерную цепь и определить отклонения от параллельности плоскости 4 относительно плоскости 5.

Задачу решить двумя методами: максимума-минимума и вероятностным в предположении о нормальном распределении отклонений расположения и риске  $P = 0,27 \%$ .



Учебное издание

СКВОРЦОВ Владимир Фёдорович

## ОСНОВЫ РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИЙ ИЗДЕЛИЙ

Учебное пособие

Научные редакторы:  
*кандидат технических наук,  
доцент А.Ю. Арляпов;*

*кандидат технических наук,  
доцент М.Г. Гольдшмидт*


Редактор *Д.В. Заремба*  
Компьютерная верстка *К.С. Чечельницкая*  
Дизайн обложки *Т.А. Фатеева*

Подписано к печати 25.10.2012. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 10,87. Уч.-изд. л. 9,84.  
Заказ 1317-12. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества Издательства  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru