

Московский государственный технический университет
им. Н.Э.Баумана

Л.М.Гоперядце, З.Ф.Уразов

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ СБОРКИ ПРИБОРОВ

Утверждено редакцией МГТУ
в качестве учебного пособия
по технологической части дипломных проектов

Под редакцией П.В.Сыроваченко

Издательство МГТУ

1993

Рецензенты: В.И.Иванов, В.М.Крикун

Г74 Гоцерадзе Р.М., Уразаев З.Ф. Методы обеспечения точности сборки приборов: Учеб. пособие по технологической части дипломных проектов / Под ред. П.В.Сировагченко. М.: Изд-во МГТУ, 1983. - 52 с., ил.

ISBN 5-7038-1095-7

Приведены общие методы точностного расчета приборов, расчета размерных цепей в электромеханических узлах, применены методы достижения точности сборки, иллюстрируемые примерами.

Для студентов-дипломников всех специальностей факультетов ИУ и РИ.

Табл. 8. Ил. 7. Бюблпогр. 16 назв.

ББК 34.9

ISBN 5-7038-1095-7

© МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1983.

При разработке технологических процессов (ТП) сборки приборов практически всегда возникает задача выбора методов и средств обеспечения точности приборов и их функциональных элементов. Эта задача может быть в техническом и экономическом плане оптимально решена только за счет обоснованной увязки требований точности K выходным параметрам приборов с требованиями точности к их элементам или деталям на основе соответствующих расчетов. Эти расчеты производятся с целью определения результирующей погрешности прибора, выявления погрешностей, оказывающих решающее влияние (доминирующих погрешностей) на функциональные показатели или выходные параметры прибора. Знание значимости погрешностей позволяет управлять ТП для снижения результирующей погрешности до допустимой величины.

В свою очередь если выбран какой-то метод достижения точности прибора при сборке, то на основе несложных расчетов можно определить требования технологичности конструкции прибора и его элементов.

I. ОБЩАЯ МЕТОДИКА ТОЧНОСТНОГО РАСЧЕТА ПРИБОРОВ

Для проведения точностного расчета приборов должна быть известна функциональная зависимость выходного параметра N прибора от независимых первичных параметров q_1, q_2, \dots, q_n его элементов, которым присущи производственные погрешности $\Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_n$, т.е. зависимость

$$N = f(q_1, q_2, \dots, q_n, A), \quad (I)$$

где A - измеряемая величина; n - общее число этих параметров. В дальнейшем будем обозначать $i = 1, 2, \dots, n$ - номер независимого первичного параметра.

Полагая, что функция N дифференцируется хотя бы в области значений q_1, q_2, \dots, q_n , можно найти результирующую погрешность ΔN выходного параметра прибора из-за первичных производственных погрешностей по уравнению

$$\Delta N = \frac{\partial N}{\partial q_1} \Delta q_1 + \frac{\partial N}{\partial q_2} \Delta q_2 + \dots + \frac{\partial N}{\partial q_n} \Delta q_n \quad (2)$$

или

$$\Delta N = \xi_i \Delta q_i + \xi_2 \Delta q_2 + \dots + \xi_n \Delta q_n.$$

где $\xi_i = \frac{\partial N}{\partial q_i}$ - передаточное отношение (коэффициент влияния), определяющее степень влияния погрешности Δq_i параметра q_i на выходной параметр N .

При расчете погрешности ΔN одного прибора, собираемого из комплекта деталей и элементов с известными погрешностями Δq_i , последние входят в формулу (2) как алгебраические величины, т.е. с учетом их знаков. Для определения возможного рассеивания значений выходного параметра одного прибора при сборке его из деталей и элементов, параметры которых могут изменяться в пределах соответствующих допусков T_1, T_2, \dots, T_n , в формулу (2) следует подставлять скалярные значения этих допусков.

При расчете по вероятностному методу для партии приборов, учитывающему, что первичные параметры являются случайными величинами применяют формулу

$$\Delta N = \sqrt{(k_1 \xi_1 T_1)^2 + (k_2 \xi_2 T_2)^2 + \dots + (k_n \xi_n T_n)^2} \quad (3)$$

k_1, k_2, \dots, k_n - коэффициенты относительного рассеивания погрешностей геометрических или физических параметров q_i в пределах соответствующих полей допусков T_i . Для i -го па- [16]:

$$k_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_k} \quad (3a)$$

Здесь λ_i и λ_k - относительные средние квадратические отклонения соответственно погрешностей первичных параметров (i) и результирующей погрешности конечного параметра (k). Погрешностью конечного параметра для размерной цепи является результирующая погрешность размера замыкающего звена, а для кинематической цепи - результирующая погрешность положения ведомого звена кинематической цепи. Отклонения λ_i и λ_k определяются

видом кривой распределения значений каждого параметра и процентом риска выхода части значений параметра за границы допуска. При $V_i = T_i$ и $V_k = T_k$

$$\lambda_i = \frac{\sigma_i}{0,5 T_i}; \quad \lambda_k = \frac{\sigma_k}{0,5 T_k} \quad (3б)$$

где σ_i и σ_k - средние квадратические отклонения значений соответственно i -го и конечного параметров; T_i и T_k - допуски на эти параметры; V_i и V_k - поля их рассеивания.

Из формул (3а) и (3б)

$$k_i = \frac{\sigma_i T_k}{\sigma_k T_i} \quad (3в)$$

При $0,5 T_k = 3 \sigma_k$

$$\lambda_k = \frac{1}{3}; \quad k_k = 3 \lambda_k = 1; \quad (3г)$$

$$k_i = 3 \lambda_i = \frac{3 \sigma_i}{0,5 T_i}$$

При практических расчетах можно принять $k_1 = k_2 = \dots = k_n = k$, причем при $n \leq 9$ можно принять $k = 1,3 \dots 1,4$ и при $n \geq 10$ - $k = 1,2 \dots 1,3$.

Поле рассеивания значения выходного параметра прибора, если оно зависит от двух-трех и даже четырех параметров входящих элементов и деталей, также может определяться по (2), а вместо погрешностей Δq_i следует подставлять соответствующие допуски T_i со своими множителями ξ_i как скалярные величины.

Обеспечить заданную точность при сборке прибора или его функционального элемента можно следующими методами: полной взаимозаменяемости или неполной взаимозаменяемости и групповой взаимозаменяемости.

Применение первого метода возможно, если результирующая погрешность выходного параметра прибора ΔN меньше соответствующего допуска T_N или равна ему*, что выражается соотношением

* Это справедливо, если ΔN определялась по формуле (2). Но если вычислялась по (3), то можно говорить о применении этого метода, считая какой-то процент риска (например, 0,27 %) пренебрежимо малым (27 узлов из 10000 собранных могут иметь $\Delta N > T_N$).

кости изготовления деталей и сборки прибора, но и к понижению стабильности его характеристик во времени — отклоние деформации пакета "регулируемых" прокладок при воздействии вибрационных нагрузок изменяют отрегулированный осевой зазор в опорах узла.

В электрических цепях определить параметры регулировочных элементов без соответствующих расчетов оказывается просто невозможным.

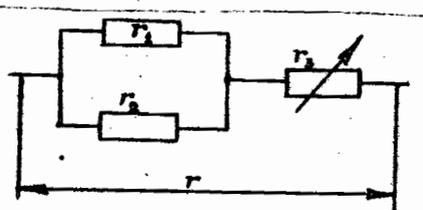


Рис. 7. Электрическая схема с компенсационным сопротивлением

Пусть в электрической цепи, схема которой приведена на рис. 7, требуется найти среднее (номинальное) значение и требуемый диапазон изменения регулировочного сопротивления r_3 для того, чтобы общее выходное сопротивление цепи было в пределах $r = (310 \pm 1) \text{ Ом}$.

Дано: $r_1 = (300 \pm 15) \text{ Ом}$ и $r_2 = (700 \pm 35) \text{ Ом}$.

Выражение (1) для среднего (номинального) значения выходного параметра цепи — сопротивления имеет вид [7]

$$r = r_3 + \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2},$$

которое разрешим относительно регулировочного сопротивления

$$r_3 = r - \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}. \quad (49)$$

Номинальное (или среднее) значение его составит

$$r_3 = 310 - \frac{300 \cdot 700}{300 + 700} = 100 \text{ Ом}.$$

Требуемый диапазон изменения сопротивления Δr_3 по (2) при подстановке вместо погрешностей Δr , Δr_1 и Δr_2 соответ-

ствующих допусков на них $T_r = 2 \text{ Ом}$, $T_1 = 30 \text{ Ом}$ и $T_2 = 70 \text{ Ом}$ будет таким:

$$\begin{aligned} \Delta r_3 &= \frac{\partial r_3}{\partial r} T_r + \frac{\partial r_3}{\partial r_1} T_1 + \frac{\partial r_3}{\partial r_2} T_2 = \\ &= T_r + \frac{r_2^2}{(r_1 + r_2)^2} T_1 + \frac{r_1^2}{(r_1 + r_2)^2} T_2 = \\ &= 2 + \frac{700^2}{(700 + 300)^2} \cdot 30 + \frac{300^2}{(700 + 300)^2} \cdot 70 = 25,0 \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (50)$$

Таким образом, значение регулировочного сопротивления может находиться в пределах $r_3 \pm 0,5 \Delta r_3 = (100 \pm 12,5) \text{ Ом}$.

Из наложенных общих положений обеспечения точности приборов при их сборке, а также рассмотренных примеров видно, что для решения этой проблемы нужен системный подход, учитывающий не только производственно-экономические вопросы, но и функциональное назначение прибора или его элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Якушев А.М. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. 5-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1979. 343 с.
2. Справочник контролера машиностроительного завода: Допуски, посадки, линейные измерения / Под ред. Якушева А.И.; 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1980. 527 с.
3. Тищенко О.Ф., Вавелинский А.С. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. М.: Машиностроение, 1977. 357 с.
4. Сборка, регулировка, испытания авиационных приборов / Уразаев З.Ф., Асс Б.А., Алексеев Я.Н., Мясников В.Я. М.: Машиностроение, 1983. 288 с.
5. Прадди В.Ф., Шетинин А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: Метод. указания к курсовой работе. Калининград: РИО КТИРПХ, 1983. 88 с.
6. Бальмонт В.Б. Оптимизация допусков на входные параметры изделия по критерию наименьшей стоимости // Известия ВУЗов. Машиностроение. № 8. 1983. С. 137-140.

Полагая, что функция F дифференцируется хотя бы в области значений X_1, X_2, \dots, X_{m-1} , можно найти общее уравнение, связывающее отклонения размеров в размерной параметрической цепи /см. формулу (2)/:

$$\Delta Y = \frac{\partial F}{\partial X_1} \Delta X_1 + \frac{\partial F}{\partial X_2} \Delta X_2 + \dots + \frac{\partial F}{\partial X_{m-1}} \Delta X_{m-1}. \quad (6)$$

Размерные параметрические цепи могут состоять из геометрических размеров, резисторов, конденсаторов и т.д.

РД 50-635-87 вводит основные положения, термины, обозначения и определения для размерных цепей (РЦ), состоящих из геометрических размеров.

Звено РЦ - один из размеров, образующих РЦ.

Замыкающее звено - звено РЦ, являющееся исходным при постановке задачи или получающееся последним в результате ее решения.

Составляющее звено - звено РЦ, функционально связанное с замыкающим звеном.

Увеличивающее звено - составляющее звено РЦ, с увеличением которого замыкающее звено увеличивается (т.е. для которого передаточная функция $\xi_i = \frac{\partial F}{\partial X_i} > 0$).

Уменьшающее звено - составляющее звено РЦ, с увеличением которого замыкающее звено уменьшается (т.е. для которого $\xi_i < 0$).

Компенсирующее звено - составляющее звено РЦ, изменением которого достигается требуемая точность замыкающего звена.

Общее звено - звено, одновременно принадлежащее нескольким РЦ.

Схема РЦ - графическое изображение РЦ.

На схемах РЦ (см. рис. 1) буква, обозначающая компенсирующее звено, заключается в прямоугольник.

Над буквой, обозначающей увеличивающее звено, ставится стрелка, направленная вправо, а для уменьшающего звена - влево. Обозначение общего звена формируется из обозначений звеньев размерных цепей, в которые входит данное звено со знаком ра-
векства между ними.

Звеньями РЦ, состоящих из геометрических размеров, могут быть как линейные, так и угловые размеры.

У линейной РЦ звеньями являются линейные размеры, и они обозначаются прописными буквами русского алфавита А, Б, В, ..., а у угловой РЦ звеньями являются угловые размеры, и они обозначаются строчными буквами греческого алфавита β, γ, \dots (кроме букв $\alpha, \delta, \xi, \lambda, \omega$).

На схемах РЦ звенья условно обозначаются (рис. 2): линейные размеры - двусторонней стрелкой (а); параллельность - односторонней стрелкой-линией с направлением острия к базе (б); перпендикулярность - односторонней стрелкой-дугой с направлением острия к базе (в).

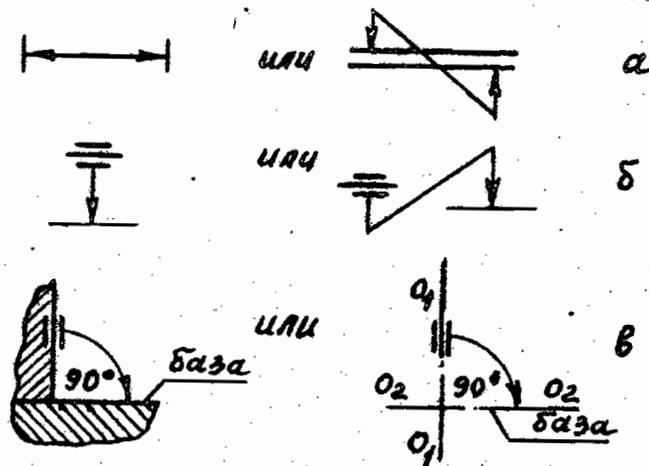


Рис. 2. Условные обозначения звеньев

При расчете и анализе РЦ определяются отклонения замыкающего звена и сравниваются с допускаемыми его отклонениями. В зависимости от соотношения между этими отклонениями выбирается метод обеспечения точности сборки, а, следовательно, метод обеспечения точности замыкающего звена.

2. Методы достижения точности замыкающего звена

(РД 50-635-87)

Метод полной взаимозаменяемости - метод, при котором требуемая точность замыкающего звена ПЦ достигается у всех объектов путем включения в нее составляющих звеньев без выбора, подбора или изменения их значений.

Метод неполной взаимозаменяемости - метод, при котором требуемая точность замыкающего звена ПЦ достигается у заранее обусловленной части объектов путем включения в нее составляющих звеньев без выбора, подбора или изменения их значений.

Метод групповой взаимозаменяемости - метод, при котором требуемая точность замыкающего звена ПЦ достигается путем включения в нее составляющих звеньев, принадлежащих к одной из групп, на которые они предварительно рассортированы.

Метод пригонки - метод, при котором требуемая точность замыкающего звена ПЦ достигается изменением размера компенсирующего звена путем удаления с компенсатора определенного слоя материала.

Метод регулирования - метод, при котором требуемая точность замыкающего звена ПЦ достигается изменением размера компенсирующего звена без удаления материала с компенсатора.

Если прибор собирается по методу полной взаимозаменяемости, исходное точностное требование совпадает с замыкающим звеном размерной цепи.

Если прибор собирается по какому-либо из четырех методов, не обеспечивающих полной взаимозаменяемости, то определение необходимого объема регулировочных работ или размеров деталей-компенсаторов также сводится к расчету замыкающего звена; но в этом случае исходное точностное требование является одним из составляющих звеньев ПЦ. Так, например, исходное требование регламентирует величину зазора в соединении, а толщина прокладок, которыми зазор обеспечивается, является замыкающим звеном ПЦ.

3. Задачи и методы расчета размерных цепей (РД 50-635-87)

Прямая задача - задача, в которой заданы параметры (номинальное значение, допустимые отклонения и т.д.) замыкающего звена ПЦ и требуется найти параметры ее составляющих звеньев.

Обратная задача - задача, в которой известны в один и

тот же момент времени параметры (допуски, поля рассеяния, координаты их середин и т.д.) составляющих звеньев ПЦ и требуется определить параметры замыкающего звена.

Решением обратной задачи проверяется правильность решения прямой задачи.

Статическая задача - задача, решаемая без учета факторов, влияющих на изменение звеньев ПЦ во времени.

Динамическая задача - задача, решаемая с учетом факторов, влияющих на изменение звеньев ПЦ во времени.

Метод расчета на максимум-минимум - метод расчета, учитывающий только предельные отклонения звеньев ПЦ и самые неблагоприятные сочетания.

Вероятностный метод расчета - метод расчета, учитывающий рассеяние размеров и вероятность различных сочетаний отклонений составляющих звеньев ПЦ.

Для различных методов достижения точности замыкающего звена необходимо применять различные методы расчета ПЦ.

Размерные цепи, для которых оказывается экономически оправданным риск возможного выхода за пределы поля допуска замыкающих звеньев и части изделий, рассчитывают вероятностным методом.

В ПЦ, в которых должна быть обеспечена полная взаимозаменяемость, допуски рассчитывают по методу максимума-минимума.

В ряде случаев возможны сочетания различных методов достижения точности замыкающего звена данной ПЦ.

4. Обозначение размеров и отклонений

(РД 50-635-87 и ЕСКД СЭВ)

Примем следующие обозначения размеров и отклонений, учитывая, что $i = 1, 2, \dots, m$ - порядковый номер звена, а m - число звеньев ПЦ:

A_i - номинальный размер i -го составляющего звена (рис. 3а, в, д);
 $A_i^{\max}, A_i^{\min}, A_{iC}$ - наибольший, наименьший предельные размеры и средний размер допуска i -го составляющего звена (рис. 3а);

$A_{iD}^{\max}, A_{iD}^{\min}, A_{iD}$ - действительные наибольший, наименьший и средний размеры i -го составляющего звена (рис. 3а, д)

в партии изготавливаемых изделий;

A_{Δ} - номинальный размер замыкающего звена (рис. 3б);

A_{Δ}^{\max} , A_{Δ}^{\min} , $A_{\Delta c}$ - наибольший, наименьший предельные размеры и средний размер допуска замыкающего звена (рис. 3б, г);

$A_{\Delta \partial}^{\max}$, $A_{\Delta \partial}^{\min}$, $A_{\Delta c \partial}$ - действительные наибольший, наименьший и средний размеры замыкающего звена (рис. 3г) в партии изготавливаемых изделий;

T_i , T_{Δ} - допуски i -го составляющего (рис. 3а) и замыкающего (рис. 3б, г) звеньев. Поле допуска для i -го составляющего звена показано на рис. 3а, а поле допуска для замыкающего звена - на рис. 3б, г;

E - обозначение отклонения;

E_s , E_i - верхнее и нижнее отклонения, например E_{s_i} и E_{i_i} (см. рис. 3а)*;

E_c - координата середины поля допуска, определяющая положение середины поля допуска относительно границы номинального размера, например E_{c_i} (см. рис. 3а);

V - действительное поле рассеяния в партии изготавливаемых изделий, например $V_i = A_{i \partial}^{\max} - A_{i \partial}^{\min}$ (см. рис. 3в, д),

$V_{\Delta} = A_{\Delta \partial}^{\max} - A_{\Delta \partial}^{\min}$ (см. рис. 3г);

E_{cV} - координата середины поля рассеяния, определяющая положение середины поля рассеяния относительно границы номинального размера, например E_{cV_i} (см. рис. 3в);

E_m - координата центра группирования, определяющая положение центра группирования относительно номинального размера, например E_{m_i} (см. рис. 3д);

* В РЦ удобно применять обозначения, отличные от ЕСПД СЗВ (в которой, как известно, E_s , E_i - отклонения отверстий, а e_s , e_i - отклонения валов), так как многие размеры РЦ не подходят под понятия "отверстие" или "вал", например ширина и глубина уступа. Кроме того, вместо обозначений $E_s A_{\Delta}$, $E_i A_{\Delta}$, $E_s A_i$, $E_i A_i$, T_{Δ} , T_i , $E_m A_{\Delta}$, $E_m A_i$ (и т.д.), принятых в приложениях к РД 50-635-87, для простоты написания будем применять обозначения $E_{s\Delta}$, $E_{i\Delta}$, E_{s_i} , E_{i_i} , T_{Δ} , T_i , $E_{m\Delta}$, E_{m_i} (и т.д.), что вполне оправдано при расчете одной РЦ. Для связанных (параллельно или последовательно) размерных цепей необходимо около каждого обозначения писать букву, которой обозначается звено данной РЦ.

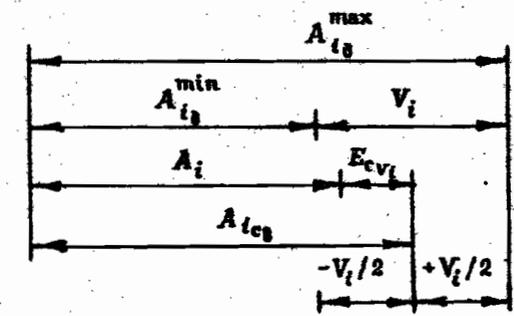
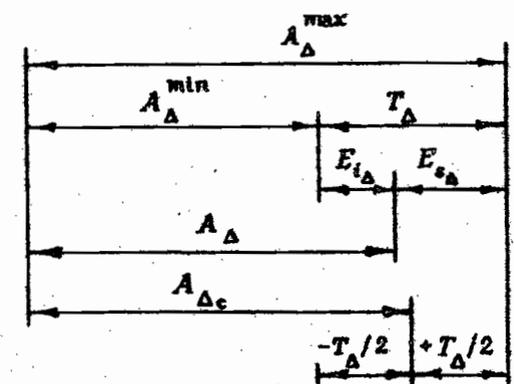
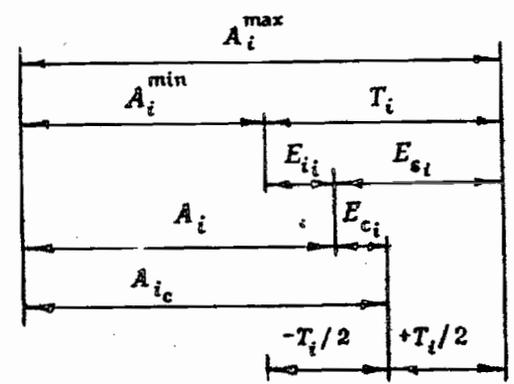
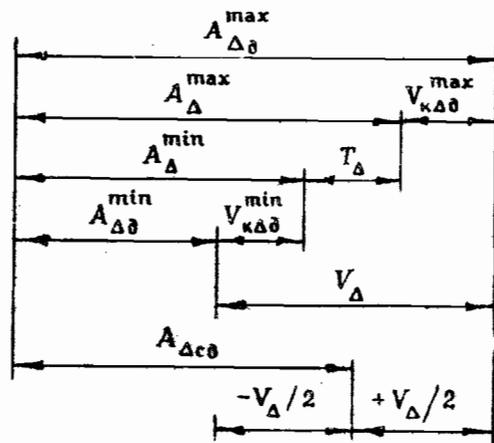
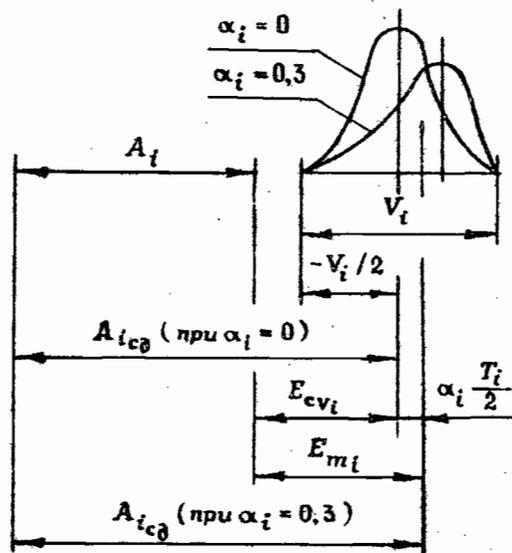


Рис. 3. Обозначение размеров и отклонений размерных цепей (см. также с. 14)



2



3

Рис. 3. Окончание

V_k - наибольшая расчетная компенсация, т.е. наибольшее возможное расчетное отклонение, выходящее за пределы поля допуска, замыкающего звена, подлежащее компенсации, например

$$V_{к\Delta\delta}^{max} = A_{\Delta\delta}^{max} - A_{\Delta}^{max}, \quad V_{к\Delta\delta}^{min} = A_{\Delta}^{min} - A_{\Delta\delta}^{min}$$

(см. рис. 3г).

5. Расчетные коэффициенты

Относительное среднее квадратическое отклонение λ - коэффициент, характеризующий закон рассеивания размеров или их отклонений. Для i -го звена /см. формулы (36)/:

$$\lambda_i = \frac{2\sigma_i}{V_i}, \quad (7)$$

где σ_i - среднеквадратическое отклонение.

Коэффициент риска t_{Δ} - коэффициент, характеризующий вероятность выхода отклонений замыкающего звена за пределы допуска.

Коэффициент риска t_{Δ} выбирается из таблиц значений функции Лапласа $\Phi(t)$ в зависимости от принятого риска P .

При нормальном законе распределения отклонений и равновероятном их выходе за обе границы поля допуска значение P (в %) связано со значением $\Phi(t)$ формулой

$$P = 100 [1 - 2\Phi(t)] \quad (8)$$

Ряд значений коэффициента t_{Δ} приведен в табл. I.

Таблица I

Риск P , %	Коэффициент t_{Δ}	Риск P , %	Коэффициент t_{Δ}
32,00	1,00	1,00	2,57
10,00	1,65	0,27	3,00
4,50	2,00	0,10	3,29
		0,01	3,89

При нормальном законе распределения (законе Гаусса) коэффициент $\lambda_i^2 = 1/9$.

При наличии фактических данных о законе распределения отклонений значение коэффициента λ_i^2 может быть рассчитано по [9, 10].

Коэффициент относительной асимметрии α_i - коэффициент, характеризующий асимметрию кривой рассеяния размеров. Для i -го звена

$$\alpha_i = \frac{E_{m_i} - E_{c_{v_i}}}{0,5 V_i} \quad (9)$$

Передачное отношение составляющего звена ξ_i - коэффициент, характеризующий степень влияния отклонения составляющего звена на отклонение замыкающего. Для i -го звена /см. формулы (2) и (6)/:

$$\xi_i = \frac{\partial F}{\partial A_i} \quad (10)$$

Примечание. В зависимости от вида ЦЦ передачное отношение может иметь различные содержание и значение. Например, для линейных цепей с параллельными звеньями передачные отклонения равны: $\xi_i = 1$ - для увеличивающих составляющих звеньев; $\xi_i = -1$ - для уменьшающих составляющих звеньев. Для звеньев, повернутых относительно координатных осей, роль передачных отношений выполняют тригонометрические функции, используемые при проектировании составляющих звеньев на соответствующие координатные оси. Таким образом, содержание передачного отношения и его величину следует определять в соответствии с характером решаемой задачи и особенностями размерной цепи и ее составляющих звеньев.

6. Порядок построения ЦЦ

В зависимости от решаемой задачи изображают схему либо изделия, либо технологической системы "станок - приспособление - инструмент - деталь" (СИИД), либо технологического процесса, либо измерения, на которую наносят размерную цепь или размерные цепи.

Допускается для каждой ЦЦ изображать отдельную схему.

Исходя из поставленной задачи определяют замыкающее звено. Обычно замыкающим звеном являются или расстояние между поверхностями (их осями), или их относительный поворот, которые требуется обеспечить либо при конструировании изделия, либо достичь в процессе его изготовления, либо определить измерением.

Начиная от одной из поверхностей (осей), ограничивающих замыкающее звено, находят составляющие звенья ЦЦ, непосредственно участвующие в решении поставленной задачи, и доходят до второй поверхности (оси), ограничивающей замыкающее звено.

16

7. Основные расчетные формулы

Номинальный размер замыкающего звена ЦЦ A_Δ вычисляют по формуле

$$A_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i A_i \quad (11)$$

Координату середины поля допуска E_{c_Δ} замыкающего звена рассчитывают по формуле

$$E_{c_\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i E_{c_i} \quad (12)$$

где

$$E_{c_\Delta} = \frac{E_{s_\Delta} + E_{i_\Delta}}{2}$$

$$E_{c_i} = \frac{E_{s_i} + E_{i_i}}{2} \quad (12a)$$

Допуск замыкающего звена определяют по формулам:

а) при расчете по методу максимума-минимума

$$T_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| T_i \quad (13)$$

Здесь

$$T_\Delta = E_{s_\Delta} - E_{i_\Delta}, \quad T_i = E_{s_i} - E_{i_i} \quad (13a)$$

где T_i - допуск i -го звена.

б) при расчете по вероятностному методу

$$T_\Delta = t_\Delta \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 T_i^2} \quad (14)$$

Среднее значение допуска составляющих звеньев находят по формулам:

а) при расчете по методу максимума-минимума

$$T_{i_c} = \frac{T_{\Delta}}{\sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i|} \quad (15)$$

в частном случае, когда $|\xi_i| = 1$,

$$T_{i_c} = \frac{T_{\Delta}}{m-1}; \quad (16)$$

б) при вероятностном методе расчета

$$T_{i_c} = \frac{T_{\Delta}}{t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2}} \quad (17)$$

Предельные отклонения i -го составляющего звена E_{s_i} и E_{i_t} вычисляют по формулам:

$$E_{s_i} = E_{c_i} + \frac{T_i}{2} \quad (18)$$

$$E_{i_t} = E_{c_i} - \frac{T_i}{2} \quad (19)$$

Координату середины поля рассеяния замыкающего звена рассчитывают по формуле

$$E_{c_{V_{\Delta}}} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i E_{c_{V_i}} \quad (20)$$

Координату центра группирования отклонений замыкающего звена $E_{m_{\Delta}}$ определяют по формуле

$$E_{m_{\Delta}} = \sum_{i=1}^{m-1} \left(\xi_i E_{c_{V_i}} + \alpha_i \frac{|\xi_i| V_i}{2} \right) \quad (21)$$

Поле рассеяния замыкающего звена V_{Δ} находят по формулам:

а) при расчете по методу максимума-минимума

$$V_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| V_i; \quad (22)$$

б) при вероятностном методе расчета

$$V_{\Delta} = t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 V_i^2} \quad (23)$$

Наибольшую возможную компенсацию V_k вычисляют по формуле

$$V_k = T_{\Delta}' - T_{\Delta} \quad (24)$$

где T_{Δ}' - производственный допуск замыкающего звена.

Величину поправки E_k рассчитывают по формуле

$$E_k = \frac{V_k}{2} + \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i E_{c_i}' - E_{c_{\Delta}} \quad (25)$$

где E_{c_i}' - координата середины производственного поля допуска составляющего звена A_i .

Число ступеней неподвижных компенсаторов N определяют по формуле

$$N = \frac{T_{\Delta}'}{T_{\Delta} - T_{\text{комп}}} \quad (26)$$

где $T_{\text{комп}}$ - допуск на изготовление неподвижного компенсатора.

8. Расчет РЦ по методу максимума-минимума

Метод максимума-минимума применяют при расчете коротких РЦ (с числом звеньев менее пяти) с высокой точностью замыкающего звена или многозвенных РЦ с малой точностью замыкающего звена.

При расчете по этому методу допустимые предельные отклонения размеров деталей складываются.

Метод максимума-минимума основан на обеспечении полной взаимозаменяемости, условием которой является

$$\sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| T_i = T_{\Delta}$$

/см. формулу (13)/, причем в линейной РЦ

$$|\xi_i| = 1 \quad (27)$$

/см. примечание к формуле (10), а модуль передаточного отноше-

ния составляющего звена ξ_i при расчете РЦ берется в связи с тем, что допуск по определению является существенно положительной величиной и допуск замыкающего звена не может быть равен нулю/.

Прямая задача (алгоритм расчета приведен на рис. 4)

[I, 2, 3, 4, 6] :

- а) сформулировать задачу и установить замыкающее звено;
- б) исходя из поставленной задачи установить номинальный размер A_Δ , координату середины поля допуска $E_{c\Delta}$, допуск T_Δ или предельные отклонения $E_{s\Delta}$ и $E_{i\Delta}$ замыкающего звена, учитывая, что /см. (I2a) и (I3a)/

$$E_{c\Delta} = \frac{E_{s\Delta} + E_{i\Delta}}{2}$$

$$T_\Delta = E_{s\Delta} - E_{i\Delta};$$

- в) выявить составляющие звенья A_i , построить схему РЦ, составить ее основное уравнение и определить передаточные отклонения ξ_i /см. формулу (I0)/;

- г) рассчитать номинальные значения A_i составляющих звеньев, исходя из данных чертежа, и произвести проверку /см. формулу (II)/

$$A_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i A_i;$$

- д) рассчитать среднюю величину допуска T_{i_c} /см. формулы (I5) и (I6)/ или среднюю степень точности (коэффициент точности) α_c составляющих размеров

$$T_{i_c} = \frac{T_\Delta}{m-1} \quad \text{при } |\xi_i| = 1;$$

$$\alpha_c = \frac{T_\Delta}{\sum_{i=1}^{m-1} (0,45 \sqrt[3]{D_{M_i}} + 0,001 D_{M_i})} = \frac{T_\Delta}{\sum_{i=1}^{m-1} i_{M_i}}, \quad (28)$$

где $D_{M_i} = \sqrt{D_{M_{вi}} \cdot D_{M_{нi}}}$ - среднее геометрическое интервала диаметров, мм; $i_{M_i} = 0,45 \sqrt[3]{D_{M_i}} + 0,001 D_{M_i}$ - единица допуска для

интервала диаметров, мкм (табл. 2);

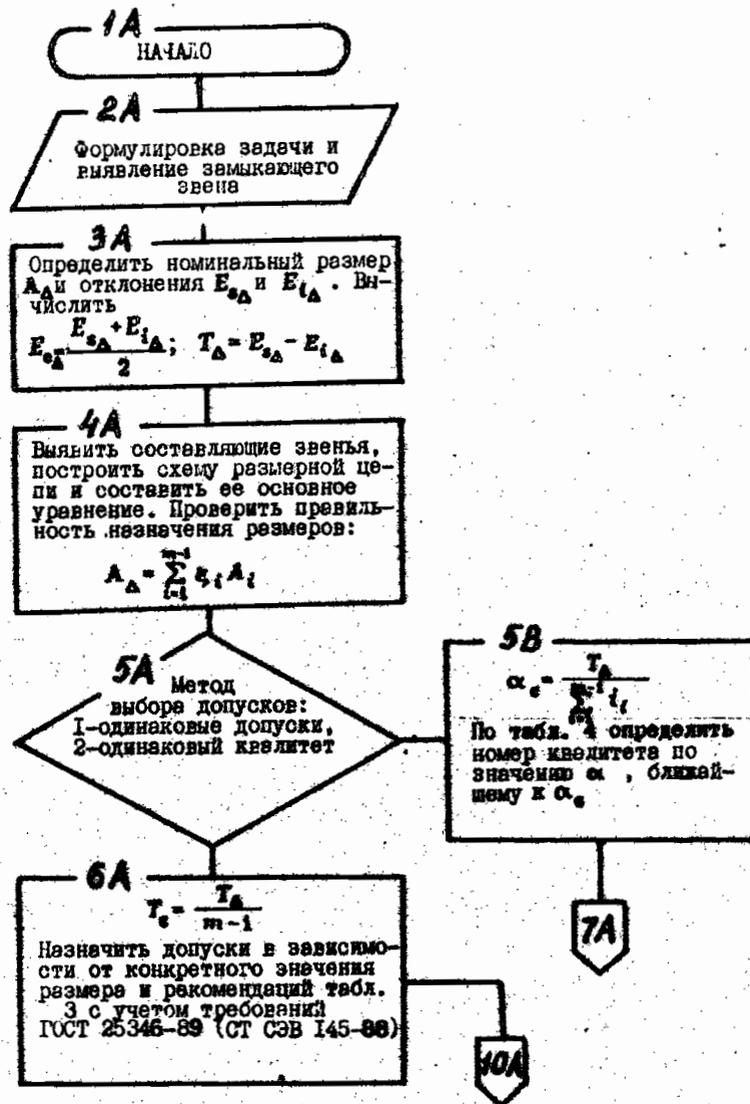


Рис. 4. Блок-схема алгоритма размерной цепи по методу максимума-минимума (см. также с. 22 и 23)

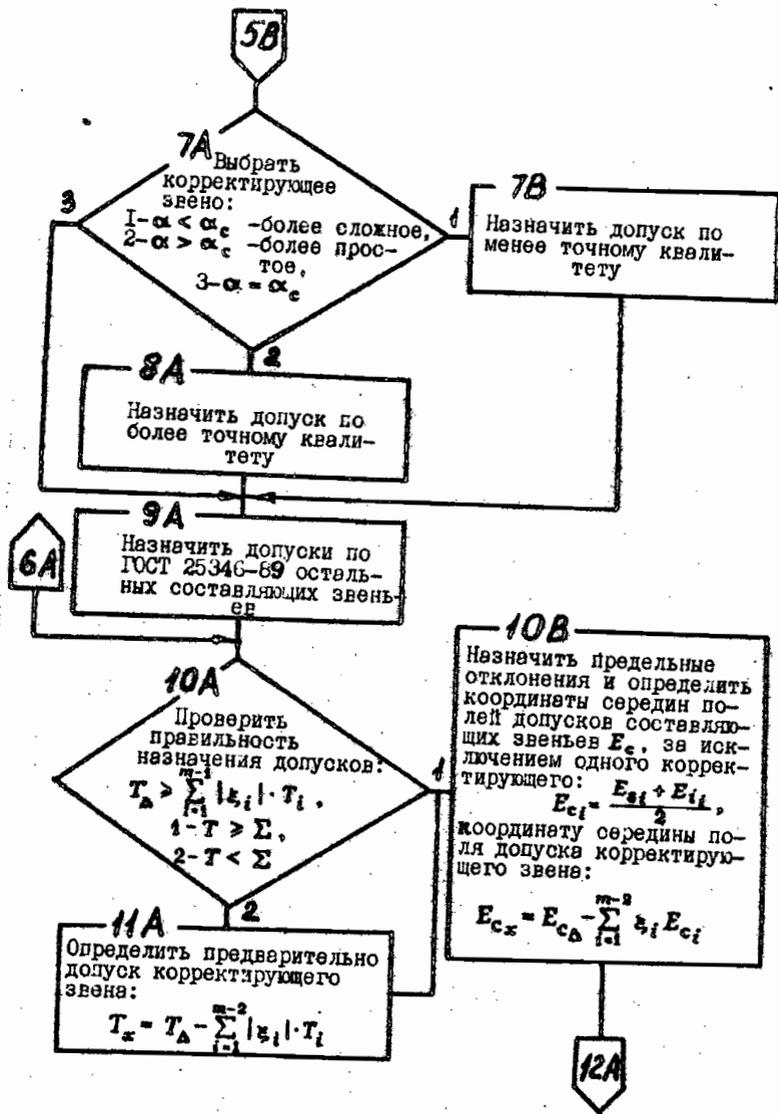


Рис. 4. Продолжение

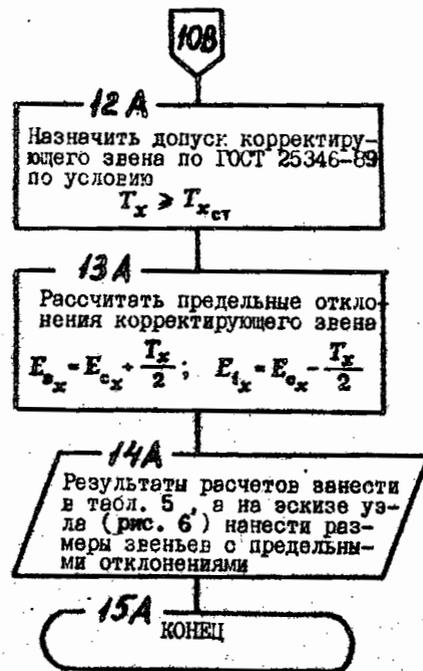


Рис. 4. Окончание

Таблица 2

Интервал диаметров свыше $D_{нм}$ до $D_{нб}$, мм	Единица допуска i_n , мкм
До 3	0,55
Свыше 3 до 6	0,73
" 6 " 10	0,90
" 10 " 18	1,08
" 18 " 30	1,31
" 30 " 50	1,56
" 50 " 80	1,86
" 80 " 120	2,17
" 120 " 180	2,52
" 180 " 250	2,89
" 250 " 315	3,22
" 315 " 400	3,54
" 400 " 500	3,89

Формула (28) получена в предположении, что для составляющих звеньев справедлива та же зависимость допуска от номинального значения, что и для диаметральных размеров;

е) установить на основе технико-экономических соображений допуск на размер каждого звена размерной цепи.

Допуски могут быть назначены следующими способами: способом равных допусков, который рекомендуется для ПЦ с примерно одинаковыми значениями размеров составляющих звеньев; способом одной степени точности, при котором все размеры должны быть выполнены с примерно одинаковой точностью (по одному качеству); способом равных вкладов погрешностей составляющих звеньев в погрешность замыкающего звена или способом равного влияния, который основан на том, что допустимое отклонение каждого составляющего звена должно оказывать одинаковое изменение замыкающего звена; способом минимальной себестоимости изделия, при котором по заданному допуску на замыкающее звено и передаточным отношениям всех звеньев определяются допуски на составляющие звенья, обеспечивающие минимальную себестоимость изделия; способом пробных расчетов, который заключается в том, что допуски на составляющие звенья назначают экономически целесообразными для условий предстоящего вида производства с учетом конструктивных

требований и опыта эксплуатации имеющихся подобных механизмов.

С последними тремя способами можно подробнее ознакомиться в [1, 2, 3, 6, 9].

При расчете плоских ПЦ с постоянными передаточными отношениями наиболее широко применяются способ равных допусков и способ равных качеств, которые приведены в алгоритмах на рис. 4 и 5 и которые будем в дальнейшем использовать при расчете ПЦ.

При способе равных допусков допуски всех составляющих звеньев принимают одинаковыми:

$$T_{i_c} = T_c = T_1 = T_2 = T_i = \dots = T_{m-1} \quad (29)$$

В зависимости от конкретного значения размера значения допусков должны быть откорректированы по ГОСТ 25346-89 (СТ СЭВ 145-88). При назначении допусков ориентировочно можно пользоваться данными табл. 3. Правильность назначенных допусков проверить по условию:

$$T_{\Delta} \geq \sum_{i=1}^{m-1} |k_i| T_i \quad (30)$$

При способе одной степени точности (одного качества) допуски всех составляющих звеньев назначают по ГОСТ 25346-89 (СТ СЭВ 145-88) в зависимости от их номинального размера и принятого качества. Качество определяют по табл. 4 на основании рассчитанного по формуле (28) коэффициента точности ϵ_c с учетом данных табл. 3.

В связи с тем, что рассчитанные значения ϵ_c не всегда точно совпадают со значениями, приведенными в табл. 4, следует выбрать ближайшее значение и одно из звеньев выбрать в качестве корректирующего.

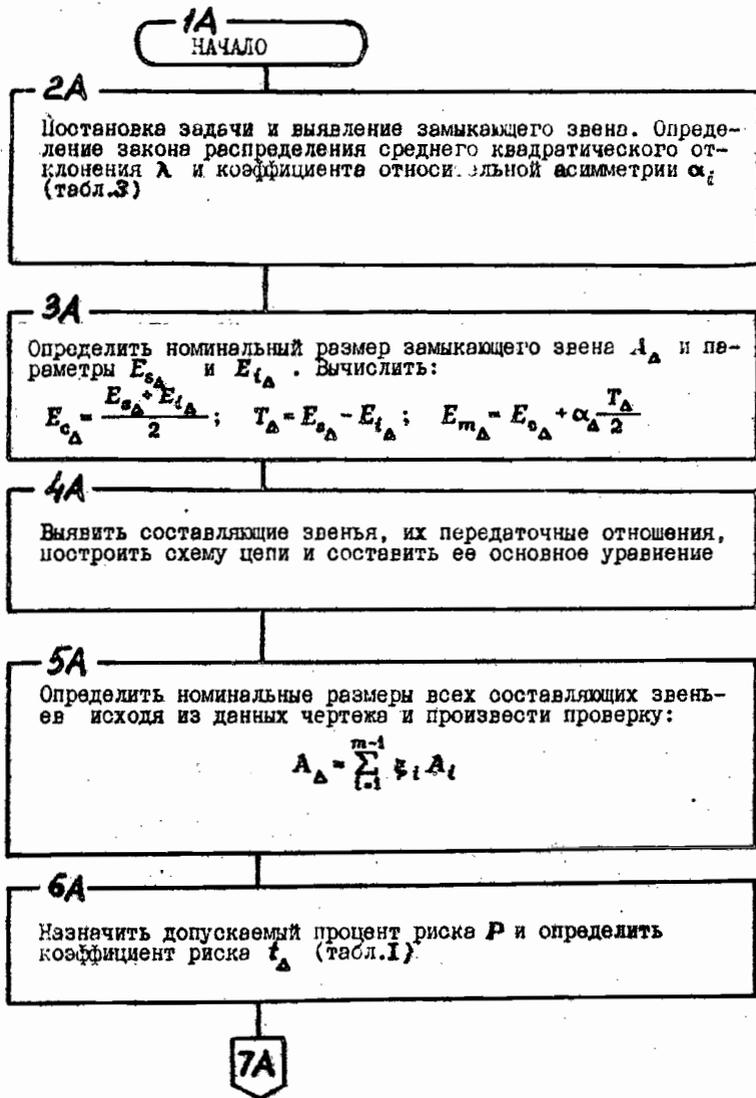


Рис. 5. Блок-схема алгоритма размерной цепи по вероятностному методу (см. также с. 27, 28, 29)

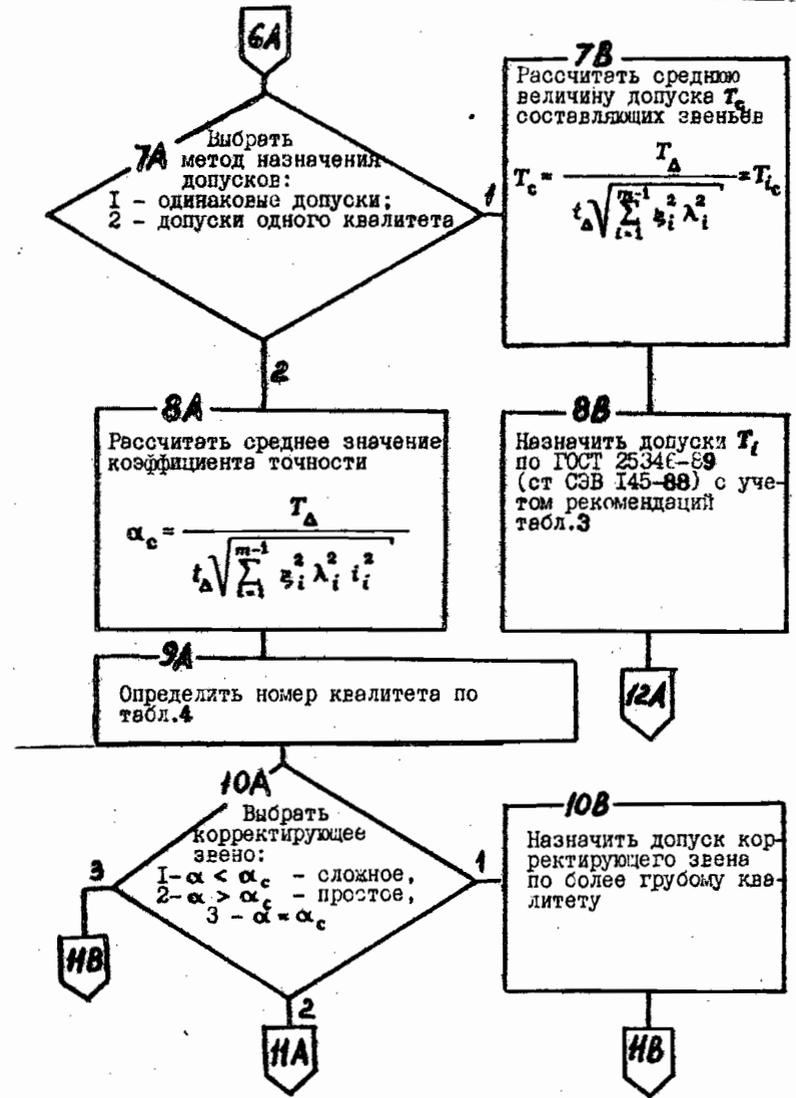


Рис. 5. Продолжение

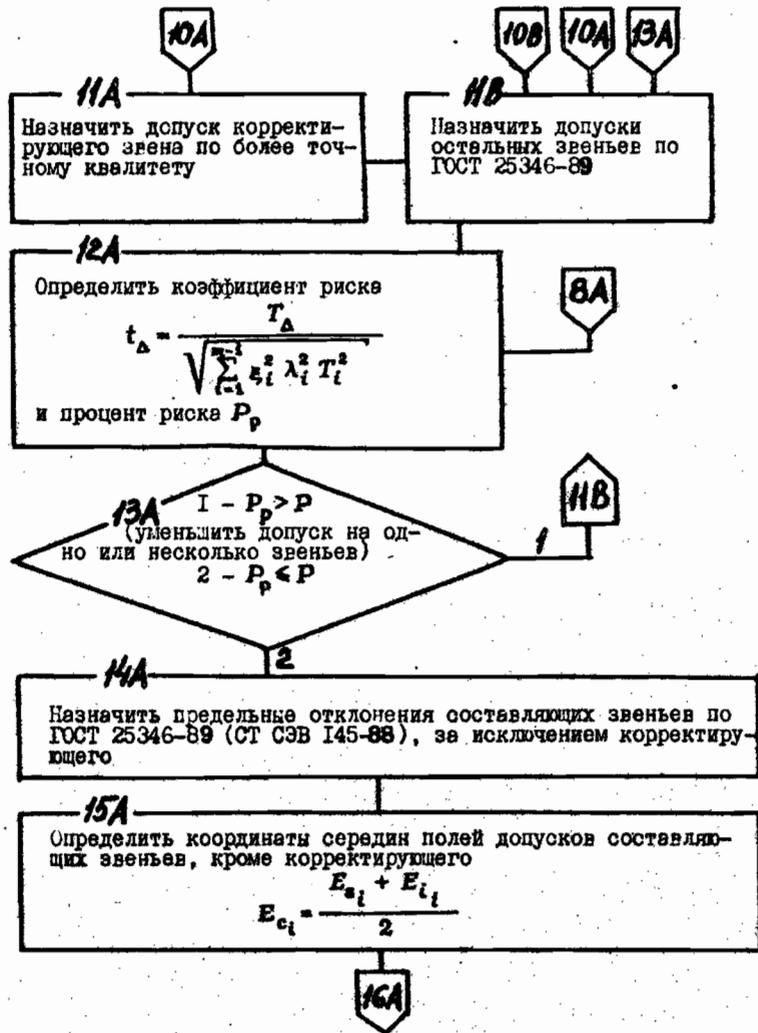


Рис. 5. Продолжение

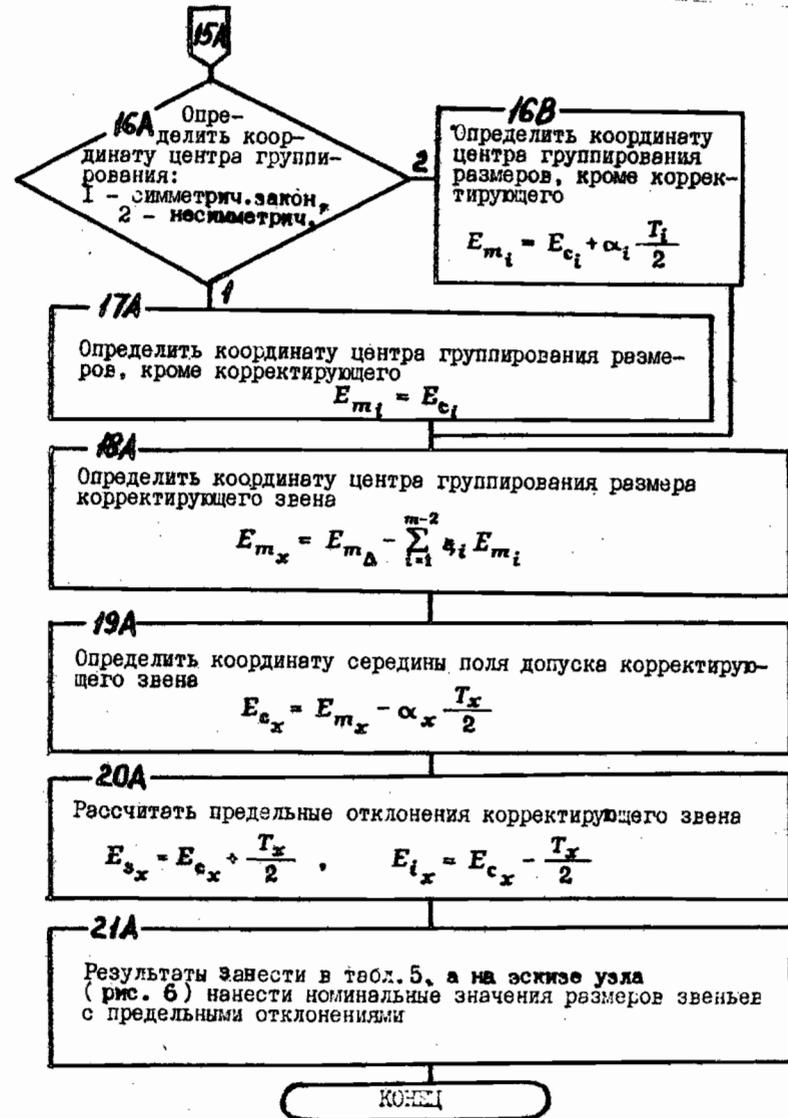


Рис. 5. Окончание

Таблица 3

Размер детали	Технологическая операция	Допуск T_i , мм	Коэффициент относительной асимметрии α_i	
			от	до
1	2	3	4	5
Расстояние от осей отверстий до базовой поверхности	Шабрение	0,04-0,10	-0,2	-0,4
	Шлифование	0,04-0,12	-0,2	-0,4
	Фрезерование	0,10-0,40	0	-0,3
	Растачивание	0,1-0,3	0	
Расстояние между осями отверстий	Растачивание	0,1-0,2	0	
Расстояние между стенками охватываемого элемента детали	Шлифование	0,02-0,1	0	-0,3
	Фрезерование	0,1-1,0	0	-0,3
	Строгание	0,1-1,0	0	-0,3
	Растачивание	0,1-1,0	0	-0,3
	Точение	0,1-0,4	0	-0,2
Расстояние между стенками охватываемого элемента детали	Шлифование	0,02-0,2	0	-0,2
	Фрезерование	0,1-1,0	0	-0,3
	Строгание	0,1-1,0	0	-0,3
	Растачивание	0,1-1,0	0	-0,3
	Точение	0,1-0,4	0	-0,3
Диаметр наружных цилиндрических поверхностей	Шлифование	0,02-0,1	0	-0,1
	Точение	0,1-0,5	0	-0,2
Диаметры отверстий	Шлифование	0,01-0,1	0	-0,2
	Развертывание	0,01-0,1	0	-0,1
	Растачивание	0,02-0,2	0	
	Сверление	0,1-0,3	0	
Радиальное биение поверхностей	Шлифование	0,01-0,02	-0,3	

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5
Торцевое биение поверхностей	Шлифование	0,01-0,1	-0,3	

Примечание. В размерных цепях с количеством звеньев $m-1 \geq 5$ коэффициент относительной асимметрии замыкающего звена $\alpha_{\Delta} = 0$.

Таблица 4

Квалитет	α	Квалитет	α
8	25	13	250
9	40	14	400
10	64	15	640
11	100	16	1000
12	160	17	1600

Если выбранный коэффициент α меньше вычисленного α_c , то в качестве корректирующего выбирается технологически более сложное звено. Если же α_c меньше α , то в качестве корректирующего выбирается технологически более простое звено. Допуск T_x корректирующего звена A_x выбирается по номинальному значению размера по ГОСТ 25346-89 и по качеству более точному, если $\alpha > \alpha_c$, и более грубому, если $\alpha < \alpha_c$ (при $\alpha = \alpha_c$ допуск T_x выбирается так же, как и для остальных звеньев). При этом выбранное значение T_x должно быть больше или равно стандартному $T_{x_{ст}}$, т.е. $T_x \geq T_{x_{ст}}$.

Произвести проверку выбранных допусков по формуле (30).

Если условие (30) не выполняется (т.е. $T_{\Delta} < \sum$), то допуск корректирующего звена необходимо определить предварительно по формуле

$$T_x = T_{\Delta} - \sum_{i=1}^{m-2} |\xi_i| T_i; \quad (30a)$$

ж) назначить предельные отклонения составляющих звеньев. Рекомендуется назначать отклонения охватываемых размеров как для основного отверстия, а отклонения охватываемых размеров

как для основного вала. Если это установить трудно, можно назначить симметричные отклонения;

з) определить координаты середин полей допусков составляющих звеньев E_{ci} , за исключением одного корректирующего по формуле /см. (12а)/

$$E_{ci} = \frac{E_{si} + E_{ti}}{2}$$

Координату середины поля допуска корректирующего звена найти по формуле

$$E_{cx} = E_{c\Delta} - \sum_{i=1}^{m-2} \xi_i E_{ci}; \quad (31)$$

и) рассчитать предельные отклонения корректирующего звена:

$$E_{sx} = E_{cx} + \frac{T_x}{2}; \quad (32)$$

$$E_{ix} = E_{cx} - \frac{T_x}{2}; \quad (33)$$

к) обработать результаты расчета. Для этого рекомендуется занести их в специальную таблицу (табл. 5), а на эскизе узла (рис. 6) нанести размеры звеньев с предельными отклонениями.

Обратная задача. Решение методом максимума-минимума:

- а) сформулировать задачу и выявить замыкающее звено;
- б) составить схему ПЦ, определить передаточные отношения звеньев и составить уравнение цепи;
- в) рассчитать номинальное значение замыкающего звена /см. формулу (11)/

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i A_i;$$

все обозначения здесь и далее приводятся в подразд. 4 и 5;

г) найти координаты середин полей допусков составляющих звеньев /см. (12а)/

$$E_{ci} = \frac{E_{si} + E_{ti}}{2};$$

Таблица 5

Обозначение звена A_i	Передаточное отношение ξ_i	Номинальный размер, мм	Допуск T_i , мм		Квалитет		Длина допуска l_i , мм	Предельные отклонения, мм		Координата центра группы допусков звена
			заданный или рассчитанный	принятый	заданный или рассчитанный	принятый		E_{si}	E_{ti}	
• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •
• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •
• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •

По методу максимума-минимума

По вероятностному методу

Закон распределения размеров звеньев _____
 Коэффициент относительной асимметрии α_i _____
 Риск $P, \%$ _____

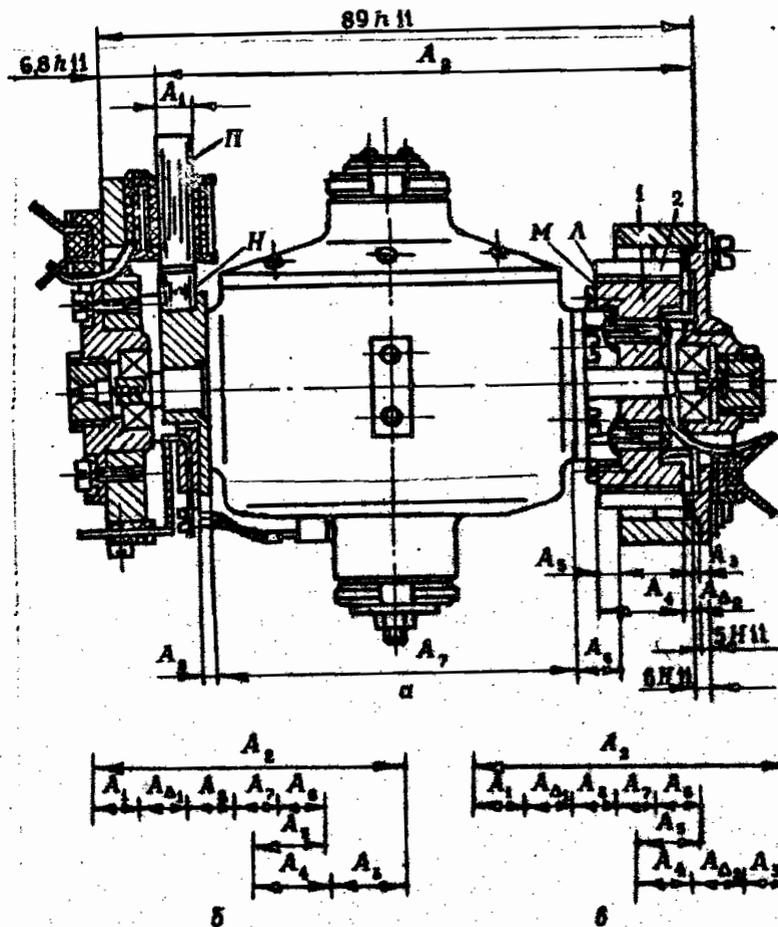


Рис. 6. Гироузел в раме (а) и схемы размерных цепей (б, в)

д) определить координату середины поля допуска замыкающего звена /см. формулу (12)/

$$E_{c\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i E_{c_i};$$

е) вычислить допуск замыкающего звена, считая $|\xi_i| = 1$ /см. формулу (13)/

$$T_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} T_i;$$

ж) рассчитать предельные отклонения размера замыкающего звена

$$E_{s\Delta} = E_{c\Delta} + \frac{T_{\Delta}}{2}, \quad (34)$$

$$E_{i\Delta} = E_{c\Delta} - \frac{T_{\Delta}}{2}; \quad (35)$$

з) занести результаты расчетов в табл. 5, а на эскизе узла (см. рис. 6) указать предельные отклонения замыкающего звена.

9. Расчет РЦ по вероятностному методу [1, 2, 5, 6]

Прямая задача (алгоритм расчета приведен на рис. 5):

а) сформулировать задачу и выявить замыкающее звено;
 б) установить и определить номинальный размер, предельные отклонения $E_{s\Delta}$ и $E_{i\Delta}$, координату середины поля допуска $E_{c\Delta}$, допуск T_{Δ} замыкающего звена и координату центра группирования $E_{m\Delta}$ /см. формулы (12), (12а), (13), (13а) и (21)/

$$E_{c\Delta} = \frac{E_{s\Delta} + E_{i\Delta}}{2}, \quad (36)$$

$$T_{\Delta} = E_{s\Delta} - E_{i\Delta}.$$

$$E_{m\Delta} = E_{c\Delta} + \alpha_{\Delta} \frac{T_{\Delta}}{2};$$

где все обозначения здесь и далее приведены в подразд. 4 и 5;

в) выявить составляющие звенья, их передаточные отношения, построить схему РЦ и составить ее основное уравнение;

г) определить номинальные размеры всех составляющих звеньев исходя из данных чертежа и произвести проверку /см. формулу (II)/

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i A_i;$$

д) назначить допустимый процент риска P выхода размера замыкающего звена за пределы поля допуска и найти коэффициент риска по табл. I;

е) установить предполагаемые законы распределения каждого из звеньев (исходя из особенностей технологического процесса обработки данной детали) и соответствующие им коэффициенты относительного рассеивания (или относительные средние квадратические отклонения) λ /см. формулу (7)/. Значение коэффициента λ для различных законов распределения следующие:

для нормального закона $\lambda = 0,33$;

для закона равной вероятности $\lambda = 0,58$ (маделля индивидуального и мелкосерийного производства);

для закона равнобедренного треугольника $\lambda = 0,41$;

для закона равномерного возрастания плотности $\lambda = 0,47$;

ж) рассчитать среднюю величину T_{i_c} /см. формулу (17)/ или среднюю степень точности (коэффициент точности) α_c составляющих звеньев:

$$T_{i_c} = \frac{T_{\Delta}}{t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2}}$$

$$\alpha_c = \frac{T_{\Delta}}{t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 (0,45 \sqrt{D_{ni}} + 0,001 D_{ni})^2}}$$

$$= \frac{T_{\Delta}}{t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 i_{ni}^2}} \quad (37)$$

где D_{ni} и i_{ni} - см. экспликация к формуле (28);

з) установить на основе технико-экономических соображений допуск на размер каждого звена РЦ.

По-прежнему допуски будем назначать способом равных допусков, который рекомендуется для РЦ с примерно одинаковыми значениями размеров составляющих звеньев, и способом одной степени точности, при котором все размеры должны быть выполнены с примерно одинаковой экономической точностью.

При способе равных допусков допуски всех составляющих звеньев принимаются одинаковыми /см. формулу (29)/:

$$T_{i_c} = T_c = T_1 = T_2 = T_i = \dots = T_{m-1}$$

В зависимости от конкретного значения размера значения допусков должны быть откорректированы по ГОСТ 25346-89 (СТ СЭВ I45-88) с учетом рекомендаций табл. 3 и проверены по формуле

$$T_{\Delta} \geq t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 T_i^2} \quad (38)$$

При способе одной степени точности (одного качества) допуски всех составляющих звеньев назначают по ГОСТ 25346-89 (СТ СЭВ I45-88) в зависимости от их номинального размера и принятого качества.

Качество определяют по табл. 4 на основании рассчитанного по формуле (37) коэффициента точности α_c с учетом рекомендаций табл. 3. В связи с тем, что рассчитанное значение α_c не всегда точно совпадает со значениями α , приведенными в табл. 4, следует выбрать ближайшее значение и одно из звеньев выбрать в качестве корректирующего A_x .

Если $\alpha < \alpha_c$, то в качестве корректирующего выбирается технологически более сложное звено, а если $\alpha > \alpha_c$, то в качестве корректирующего выбирается технологически более простое звено.

Допуск T_x корректирующего звена A_x выбирается по номинальному значению размера и по качеству более точному, чем для остальных звеньев, если $\alpha > \alpha_c$, и более грубому, если $\alpha < \alpha_c$.

и) произвести проверку выбранных допусков по формуле (38);

к) определить возможный процент риска P и оценить его приемлемость по коэффициенту риска /см. формулу (14)/

$$t_{\Delta} = \frac{T_{\Delta}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 T_i^2}} \quad (39)$$

По расчетному значению t_{Δ} найти по табл. I процент риска P .

Если это значение P больше, чем принятое в прямой задаче /см. п. д)/, то следует уменьшить допуск на одно или несколько звеньев и произвести проверку. Если значение P , найденное на основании расчетов, равно или меньше ранее принятого, назначенные допуски можно считать правильными;

ж) назначить предельные отклонения составляющих звеньев. Рекомендуется назначать отклонения охватываемых размеров, как для основного отверстия, а отклонения охватываемых размеров, как для основного вала. Для остальных размеров назначить симметричные отклонения;

з) установить координаты середин полей допусков составляющих звеньев, за исключением одного - корректирующего /см. (I2a)/

$$E_{c_i} = \frac{E_{s_i} + E_{i_i}}{2};$$

и) определить координату центра группирования E_m размеров (математическое ожидание размера) всех звеньев, за исключением корректирующего

$$E_{m_i} = E_{c_i} - \quad (40)$$

для симметричных законов (нормального, равной вероятности, равнобедренного треугольника);

$$E_{m_i} = E_{c_i} + \alpha_i \frac{T_i}{2} - \quad (41)$$

для несимметричных законов (равномерного возрастания плотности и др.). Значения коэффициента относительной асимметрии α_i приведены в табл. 3;

о) найти координату центра группирования размера корректирующего звена

$$E_{m_x} = E_{m_\Delta} - \sum_{i=1}^{m-2} \xi_i E_{m_i}; \quad (42)$$

п) определить координату середины поля допуска корректирующего звена

$$E_{c_x} = E_{m_x} - \alpha_x \frac{T_x}{2}; \quad (43)$$

р) рассчитать предельные отклонения корректирующего звена /см. формулы (32) и (33)/

$$E_{s_x} = E_{c_x} + \frac{T_x}{2}; \quad E_{i_x} = E_{c_x} - \frac{T_x}{2};$$

с) занести результаты расчетов в табл. 5, а на эскизе узла (см. рис. 6а) нанести номинальные значения размеров звеньев с предельными отклонениями.

Обратная задача. Решение вероятностным методом:

а) сформулировать задачу и выявить замыкающее звено;

б) выявить составляющие звенья, составить схему РЦ, определить передаточные отношения звеньев и записать основное уравнение цепи;

в) вычислить номинальное значение размера замыкающего звена /см. формулу (II)/

$$A_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i A_i;$$

все обозначения здесь и далее приведены в подразд. 4 и 5;

г) найти координаты середин полей допусков составляющих звеньев /см. (I2a)/

$$E_{c_i} = \frac{E_{s_i} + E_{i_i}}{2};$$

д) определить координаты центров группирования размеров составляющих звеньев /см. формулы (40) и (41) и пояснения к ним/

$$E_{m_i} = E_{c_i}; \quad E_{m_i} = E_{c_i} + \alpha_i \frac{T_i}{2};$$

е) определить координату центра группирования размера замыкающего звена

$$E_{m_\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i E_{m_i}; \quad (44)$$

ж) найти координату середины поля допуска замыкающего звена /см. формулу (36)/

$$E_{c_\Delta} = E_{m_\Delta} - \alpha_\Delta \frac{T_\Delta}{2}; \quad (45)$$

з) рассчитать предельные отклонения размера замыкающего звена /см. формулы (34) и (35)/

$$E_{s_{\Delta}} = E_{c_{\Delta}} + \frac{T_{\Delta}}{2} ; \quad E_{i_{\Delta}} = E_{c_{\Delta}} - \frac{T_{\Delta}}{2} ;$$

и) занести результаты расчетов в табл. 5, а на эскизе узла (см. рис. 6а) указать номинальный размер и предельные отклонения замыкающего звена.

Упрощенный метод расчета линейных РЦ вероятностным методом. Основными препятствиями для широкого внедрения вероятностного метода решения РЦ в практику конструкторов и технологов являются:

- а) относительная сложность расчета;
- б) отсутствие обоснованных данных по выбору коэффициентов λ_i и α_i .

В связи с этим в некоторых отраслях машино- и приборостроения внедрен упрощенный вариант вероятностного метода, также обеспечивающий расширение допусков составляющих звеньев цепи.

Допуск замыкающего звена по этому варианту определяется по формуле

$$T_{\Delta} = \Theta \sum_{i=1}^{m-1} T_i , \quad (46)$$

где Θ - коэффициент, зависящий от числа составляющих звеньев (табл. 6).

Таблица 6

Число составляющих звеньев, $m-1$	Значение коэффициента Θ	Число составляющих звеньев, $m-1$	Значение коэффициента Θ
3	0,9	6-8	0,6
4	0,8	9-12	0,5
5	0,7	Свыше 12	0,4

Пример I. Одним из требований к гироузелу (см. рис. 6а) является обеспечение расположенных торцев Н и П магнитопроводов ротора и статора индукционного преобразователя в одной плоскости. Допустимые отклонения от этого требования составит $\pm 0,35$, т.е. допуск $T_{\Delta_1} = 0,70$ мм. Надо проверить, обеспечивается ли указанное точностное требование без применения регулировочных работ. Размеры деталей приведены в табл. 7. Для размеров A_2 и A_3 , которые в производственных чертежах отсутствуют, приведенные в таблице допуски вычислены на основании зависимостей $A_2 = 89h11 - 6,8h11$ и $A_3 = 6H11 - 5H11$

Таблица 7

Звенья РЦ	Значения звеньев	Номинальное значение звеньев, мм	Среднее значение звеньев, мм	Допуск T_i , мкм	Верхнее отклонение E_s , мкм	Нижнее отклонение E_i , мкм
A_1	5 ^{-0,15} _{0,50}	5	4,675	350	-150	-500
A_2	-	82,2	82,135	310	+90	-220
A_3	-	1	1	150	+75	-75
A_4	12h12	12	11,945	110	0	-110
A_5	3h9	3	3,0125	25	+25	0
A_6	6,5h11	6,5	6,455	90	0	-90
A_7	59-0,2	59	58,9	200	0	-200
A_8	1,5h12	1,5	1,45	100	0	-100
A_{Δ_1}	0 ^{+0,35}	0	0	70	+35	-35

Решение. Считаем, что толщина A_{Δ_2} набора компенсационных прокладок между звеньями A_3 и A_4 равна нулю ($A_{\Delta_2} = 0$), а расстояние A_{Δ_1} между плоскостями Н и П в случае их неовпа-

денция является замыкающим звеном РЦ (см. рис. 6б). Зная, что звенья A_2 и A_5 увеличивающие, а остальные — уменьшающие, и учитывая примечание к формуле (10), составим уравнение РЦ по формуле (11):

$$A_{\Delta_1} = A_1 + A_3 + A_4 + A_6 + A_7 + A_8 - A_2 - A_5.$$

При расчете по методу максимума-минимума по формулам (II) и (13) при $|\xi_i| = 1$ определим среднее значение $A_{\Delta_{1c}}$ замыкающего звена и его производственный допуск T'_{Δ_1} :

$$\begin{aligned} A_{\Delta_{1c}} &= A_{1c} + A_{3c} + A_{4c} + A_{6c} + A_{7c} + A_{8c} - A_{2c} - A_{5c} = \\ &= 4,575 + 1,0175 + 11,945 + 6,455 + 58,9 + 1,45 - \\ &- 82,135 - 3,0125 = -0,7225 \approx -0,7 \text{ мм}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T'_{\Delta_1} &= T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8 = \\ &= 350 + 310 + 150 + 110 + 25 + 90 + 200 + 100 = \\ &= 1335 \text{ мкм} = 1,335 \text{ мм} \approx 1,34 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Предельные расстояния между плоскостями Н и П равны /см. формулу (30)/. $A_{\Delta_{1c}} \pm 0,5 T'_{\Delta_1} = -0,7 \pm 0,5 \cdot 1,34 = - (0,63 \dots 1,37) \text{ мм}$. Таким образом, заданная точность $T_{\Delta_1} = 0,70 \text{ мм}$ не обеспечивается, так как $T_{\Delta_1} < T'_{\Delta_1}$. Чтобы собрать гидроузел без регулировки и выполнить точностное требование, необходимо увеличить точность всех входящих размеров примерно в 2 раза ($1,34:0,70 = 1,91$), что на изделиях такого типа по технико-экономическим соображениям неприемлемо. Конструкция гидроузла предусматривает обеспечение точностного требования набором компенсационных прокладок между звеньями A_2 и A_5 толщиной A_{Δ_2} .

При вероятностном методе расчета по формуле (11) получаем $A_{\Delta_1} = 0,08 \text{ мм}$. Производственный допуск по формуле (14) при $t_{\Delta} \lambda = 1,3$ и $|\xi_i| = 1$ равен

$$T'_{\Delta_2} = t_{\Delta} \lambda \sqrt{T_1^2 + T_2^2 + T_3^2 + T_4^2 + T_5^2 + T_6^2 + T_7^2 + T_8^2} =$$

$$\begin{aligned} &= 1,3 \sqrt{350^2 + 310^2 + 150^2 + 110^2 + 25^2 + 90^2 + 200^2 + 100^2} = \\ &= 1,3 \sqrt{311925} \approx 1,3 \cdot 559 = 726,7 \text{ мкм} = 0,727 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Следовательно, производственный допуск превышает точностное требование лишь на $0,027 \text{ мм}$ ($0,727 - 0,7$). Может оказаться целесообразным повысить качество на один-два размера, входящих в РЦ, и избежать необходимости применять регулировку при сборке. В рассматриваемом примере можно заменить размер 89 н II ($-0,220$) на 89 н IO ($-0,140$).

Пример 2. Для гидроузла (см. рис. 6) из данных, приведенных в примере I, определить, в каких пределах может измениться суммарная толщина A_{Δ_2} регулировочных прокладок, и условие, при котором количество прокладок будет наименьшим.

Решение. Составим схему РЦ, в которую введем звено A_{Δ_2} (см. рис. 6в). Уравнение РЦ относительно среднего размера замыкающего звена будет таким:

$$A_{\Delta_{2c}} = A_{2c} + A_{5c} - (A_{1c} + A_{3c} + A_{7c} + A_{6c} + A_{4c} + A_{3c} + A_{\Delta_{1c}}).$$

При расчете по методу максимума-минимума по формулам (28) и (29) определим A_{Δ_2} и T_{Δ_2} . Принимая $A_{\Delta_{1c}} = 0$, имеем

$$A_{\Delta_{2c}} = 0,8 \text{ мм}. \text{ При значениях } A_{\Delta_1} = 0 \text{ и } T_{\Delta_1} = 0,70 \text{ мм и } |\xi_i| = 1 \text{ получим}$$

$$\begin{aligned} T'_{\Delta_2} &= T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8 + T_{\Delta_1} = \\ &= 350 + 310 + 150 + 110 + 25 + 90 + 200 + 100 + 70 = \\ &= 1405 \text{ мкм} = 1,4 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Таким образом, при сборке большой партии приборов могут потребоваться прокладки, суммарная толщина которых будет находиться в пределах

$$A_{\Delta_{2c}} \pm 0,5 T'_{\Delta_2} = 0,8 \pm 0,5 \cdot 1,4 = (0,1 \dots 1,5) \text{ мм}.$$

При расчете по вероятностному методу по формуле (14) при $t_{\Delta} \lambda = 1,3$ и $|\xi_i| = 1$ определим производственный допуск

$$T'_{\Delta 2} = t_{\Delta} \lambda \sqrt{T_1^2 + T_2^2 + T_3^2 + T_4^2 + T_5^2 + T_6^2 + T_7^2 + T_8^2 + T_{\Delta 1}^2} =$$

$$= 1,3 \sqrt{350^2 + 310^2 + 150^2 + 110^2 + 25^2 + 90^2 + 200^2 + 100^2 + 70^2} =$$

$$= 1,3 \sqrt{316825} = 1,3 \cdot 563 = 731,9 \text{ мкм} \approx 0,75 \text{ мм}.$$

III. РАСЧЕТ ТОЧНОСТИ ПРИБОРОВ ПО ФИЗИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

При расчетном обосновании метода обеспечения точности сборки по физическим параметрам расчетные формулы (1), (2) и (3) для каждого случая необходимо конкретизировать. Рассмотрим два примера по обеспечению точности электрических параметров элементов приборов.

Пример I. Пусть требуется изготовить проволочный резистор с сопротивлением R (1100 \pm 40) Ом катушкой константанового провода диаметром $d = 0,05_{-0,004}$ и удельным сопротивлением $\rho = 0,45 \dots 0,52$ (Ом \cdot мм²)/м (ГОСТ 5307-77) на цилиндрический каркас диаметром $D = 10_{0,1}$. Надо определить требуемое число витков катушки Q и поле рассеяния ΔR в партии резисторов из-за изменения значений d , D и ρ в указанных пределах. На основе опосредованных результатов расчета ΔR и допуска T_R решить вопрос о методе обеспечения точности значения R в партии проволочных резисторов.

Для решения этой задачи целесообразно найти среднее значение R_{0c} и поле рассеяния ΔR_0 сопротивления одного метра провода R_0 при площади поперечного сечения S . По известным формулам [например, 7] найдем

$$R_{0c} = 0,5 (R_0^{\max} + R_0^{\min}) = \frac{\rho_{\max}}{S_{\min}} + \frac{\rho_{\min}}{S_{\max}} = \frac{4 \rho_{\max}}{\pi d_{\min}^2} +$$

$$+ \frac{4 \rho_{\min}}{\pi d_{\max}^2} = \frac{4 \cdot 0,52}{\pi \cdot 0,046^2} + \frac{4 \cdot 0,45}{\pi \cdot 0,05^2} = 0,5 (313 + 229) = 271 \text{ Ом}.$$

$$\Delta R_0 = (R_0^{\max} - R_0^{\min}) = 313 - 229 = 84 \text{ Ом}.$$

Для нашего случая выражение (1) будет иметь вид

$$R = R_{0c} \cdot \pi (D + d) Q \cdot 10^{-3}, \quad (47)$$

откуда число витков обмотки

$$Q = \frac{1100}{271 \cdot 3,14 (10 + 0,05) \cdot 10^{-3}} = 129 \text{ витков}.$$

Определим диапазон изменения ΔR сопротивления согласно формуле (2):

$$\Delta R = \pi \cdot Q [(D + d) \Delta R_0 + R_{0c} \Delta D] \cdot 10^{-3} =$$

$$= 3,14 \cdot 129 [(10,0 + 0,05) \cdot 84 + 271 \cdot 0,1] \cdot 10^{-3} =$$

$$= 353 \text{ Ом}, \quad (48)$$

что в 4,4 раза превышает допустимое отклонение T_R (353:80 \approx 4,4). Возможное отклонение от номинального значения сопротивления составляет $R \pm 177$ Ом. Все это значит, что изготовить эти резисторы по методу полной взаимозаменяемости не представляется возможным. Могут применяться другие виды достижения требуемой точности сопротивления в партии резисторов.

Из (48) видно, что ΔR в большей степени зависит от ΔR_0 .

Однако полученное значение $\Delta R_0 = 84$ Ом характеризует поле рассеяния значения R_0 для проводов, намотанных на большом количестве транспортных катушек и изготовленных из разных плавов константана. В пределах одной катушки ρ и d более стабильны, чем указано в ГОСТе. Следовательно, более стабильно и значение R_0 . Пусть в данной катушке провод имеет $R_0 = 300$ Ом. Тогда отклонение от среднего значения ($R_{0c} = 271$ Ом) составит

$\Delta R_0 = 29$ Ом. Заданную точность сопротивления R при намотке проводом с данной катушки можно достигнуть уменьшением на ΔQ числа витков катушки. Этот метод можно было бы назвать "групповой подгонкой". При этом ΔQ используется как компенсатор и его значение составит

$$\Delta Q = \frac{\Delta R_0}{R_{0c}} Q = \frac{32 \cdot 150}{271} \approx 14 \text{ витков}.$$

Рассмотренный метод достижения точности значения R в партии резисторов за счет изменения числа витков приемлем, если

к обмотке не предъявляются других требований. Если, например, обмотка должна иметь какое-то постоянное значение индуктивности, то необходимо выдерживать постоянное значение R в партии резисторов, не меняя числа витков обмотки. В этом случае можно применять смешанный метод достижения точности сопротивления R , используя положения групповой взаимозаменяемости и "групповой подгонки". Провода с равных катушек рассортировывают на n групп по значению R_0 и заранее изготавливают n групп каркасов по диаметру D с тем, чтобы при помощи "групповой подгонки" получить в каждой группе среднее групповое сопротивление одного метра провода $R_{0_{гi}}$ ($i = 1, 2, \dots, n$ - номер группы), равное (в допустимых пределах) значению $R_{0_{с}} = 271 \text{ Ом}$.

В нашем примере число групп n , на которые разбиваются провода по R_0 , будет равно

$$n = \frac{\Delta R}{T_R} = \frac{353}{80} = 4,41,$$

(т.е. 5 групп), где $T_R = 80 \text{ Ом}$ - допуск на сопротивление резистора.

Групповой допуск, через который разбивается провод по значению R_0 на группы, составит

$$\Delta R_{0_{г}} = \frac{\Delta R_0}{n} = \frac{84}{5} = 17 \text{ Ом}.$$

Наименьшие значения R_0 в каждой группе приводятся в табл. 8.

Таблица 8

Группа	$R_{0_{гi}}$, Ом	$D_{гi}$, мм	Группа	$R_{0_{гi}}$, Ом	$D_{гi}$, мм
1	229	11,81	4	280	9,65
2	246	10,99	5	297	9,09
3	263	10,28			

Очевидно, что для значения $R_{0_{гi}}$ каждой группы проводов можно подобрать или подогнать (изготовить) каркас с определенным диаметром $D_{гi}$. Его значение можно определить из (47):

$$D_{гi} = \frac{R}{R_{0_{гi}} \cdot \pi \cdot Q \cdot 10^{-3}} - d.$$

Значения $D_{гi}$ для пяти групп проводов приведены в той же табл. 8.

Если каркас изготовить из алюминиевого сплава с последующим анодированием, то по D можно установить допуск $\Delta D = T_D = 0,01 \text{ мм}$.

Для любой из пяти групп проводов и каркасов можно по (47) и (48) определить значение R и возможное поле рассеяния ΔR . Так, например, для группы 2 будем иметь

$$R = R_{0_{г2}} \cdot \pi \cdot (D_{г2} + d) \cdot Q \cdot 10^{-3} = \\ = 246,0 \cdot \pi \cdot (10,99 + 0,05) \cdot 129 \cdot 10^{-3} \approx 1100 \text{ Ом},$$

$$\Delta R = \pi \cdot Q [(D_{г2} + d) \cdot \Delta R_{0_{г}} + R_{0_{г}} \cdot \Delta D] \cdot 10^{-3} = \\ = 3,14 \cdot 129 [(10,99 + 0,05) \cdot 17 + 246,0] \cdot 10^{-3} \approx 77 \text{ Ом},$$

т.е. при намотке на $D_{г2}$ для группы проводов с $R_{0_{г2}}$ сопротивление резистора находится в пределах $R = (1100 \pm 38,5) \text{ Ом}$. Нетрудно убедиться, что и намотка резисторов проводами из остальных четырех групп (см. табл. 8) на каркасы соответствующего диаметра $D_{гi}$ будет обеспечивать значение сопротивления $R = 1100 \text{ Ом}$ с заданной точностью $\pm 40 \text{ Ом}$ при постоянном значении числа витков намотки $Q = 129$.

Пример 2. При достижении точности выходного параметра прибора или функционального элемента методом регулировки необходимый и достаточный объем регулировочных работ или диапазон регулировки может быть определен также на основе точностных расчетов. В механических узлах для обеспечения точности узла по геометрическому параметру из-за неправильного расчета размерных цепей часто назначают неоправданное количество деталей-компенсаторов. Например, для регулирования осевого зазора в опорах подвижного узла относительно корпуса предусматривают и устанавливают во все приборы при их сборке определенное число прокладок не для регулирования осевого зазора, а для компенсации погрешностей определения номинальных размеров деталей и их допустимых отклонений. Это приводит не только к повышению трудоем-

$$\Delta N \leq T_N \quad (4)$$

Если это соотношение не соблюдается, то в формулах (2) или (3) следует найти наиболее значимые слагаемые переносных погрешностей и определить, нельзя ли на них технологически ужесточить допуски, чтобы соблюдалось соотношение (4), и прибор можно было собирать по методу полной взаимозаменяемости. Эта задача формализовано сводится к нахождению одного (или двух) наибольших слагаемых ϵ_i, T_i в (3) и выявлению их относительного значения в ΔN . Практическую возможность технологического ужесточения допусков T_i может решить технолог или соответствующая служба предприятия на основе экспертиз с учетом имеющихся технико-экономических показателей. Если это окажется технически и экономически нецелесообразным, то следует остановиться на сборке по методу неполной взаимозаменяемости. Но и в этом случае оптимальное решение вопроса о том, какой из методов неполной взаимозаменяемости использовать, можно получить на основе точностных расчетов по формулам (1)...(4).

Эти точностные расчеты и соответствующие решения о выборе оптимального метода обеспечения точности при сборке имеют определенную специфику для механических блоков (размерные цепи), кинематических, электрических и магнитных цепей (расчет по физическим параметрам). Наиболее формализованными являются методы расчета размерных цепей, на которые имеется РД 50-635-87 и которые описаны в технической литературе, например в [1-4].

II. РАСЧЕТ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ

I. Общие сведения

В приборах, работающих на разных физических принципах, имеются механические сборочные единицы. К геометрическим параметрам этих единиц (например, осевой зазор в опорах чувствительных элементов, колебание зазора между магнитопроводами ротора и статора в электродвигателях и датчиках и др.) предъявляются точностные требования. Эти точностные требования совместно с размерами отдельных деталей, от которых они зависят, образуют замкнутые размерные цепи.

Размерная цепь (РЦ) в соответствии с РД 50-635-87 - совокупность размеров, непосредственно участвующих в решении по-

ставленной задачи и образующих замкнутый контур.

Размерные цепи отражают объективные размерные связи в конструкции прибора, в технологических процессах изготовления его деталей и сборки.

К сборочным единицам могут предъявляться несколько точностных требований, зависящих от совокупности параметров их деталей или сборочных единиц. Тогда сборочная единица имеет несколько РЦ. Для удобства расчетов размеры деталей, образующих РЦ, выносятся из чертежа и изображаются графически в виде охемы РЦ, как показано на рис. I, на котором приводятся звенья двух размерных цепей А и Б. На рис. I имеются следующие обозначения: $\overline{A_1}$ - компенсирующее звено; A_Δ и B_Δ - замыкающие звенья; $\overline{A_1}, \overline{A_2}, \overline{A_3}, \overline{A_4}, \overline{B_1}$ - увеличивающие звенья; $\overline{A_5}, \overline{A_6}, \overline{B_2}$ - уменьшающие звенья; $\overline{A_6} = \overline{B_1}$ - общее звено размерных цепей А и Б.

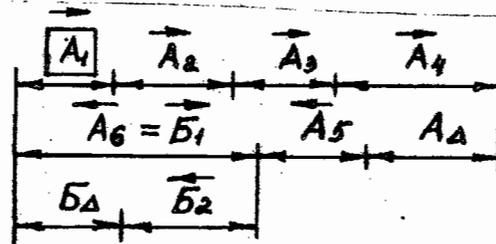


Рис. I. Схема размерных цепей с общим звеном

Инженеру-технологу приходится производить расчет РЦ:

а) при проведении анализа технологичности конструкции; б) при определении необходимых и достаточных размеров деталей-компенсаторов; в) при определении границ и допусков отдельных групп деталей при сборке по методу групповой взаимозаменяемости.

В общем случае параметрической размерной цепи называется система размеров независимых параметров X_1, X_2, \dots, X_{m-1} , влияющих на параметр Y , модель которой описывается следующим уравнением /см. формулу (1)/:

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_{m-1}) \quad (5)$$

7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник для студентов электротехнич., энергетич. и приборостроит. спец. вузов. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Выш. школа, 1984. 559 с.

8. Допуски и посадки: Справочник. Ч. I / Мягков В.Д., Палей М.А., Романов А.В., Брагинский В.А. 16-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение. 1982. 543 с.

9. Допуски и посадки: Справочник. Ч. 2 / Мягков В.Д., Палей М.А., Романов А.В., Брагинский В.А. 6-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение. 1983. 448 с.

10. Дунаев П.Ф. Размерные цепи. М.: Mashgiz, 1963. 308 с.

II. Справочник технолога приборостроителя. Т. 2 / Под общ. ред. Сыроватченко П.В. М.: Машиностроение, 1980. 463 с.

12. ГОСТ 16263-70. ГСОЕИ. Метрология. Термины и определения. Переизд. Декабрь 1990 г. - Введ. с 01.01.71. М.: Изд-во стандартов, 1991. 54 с.

13. ГОСТ 25346-89 (СТ СЭВ 145-88). ЕСДП. Общие положения, ряды допусков и основных отклонений. Переизд. Январь 1992 г. Взамен ГОСТ 25346-82. Введ. с 01.01.90. М.: Изд-во стандартов, 1992. 31 с.

14. ГОСТ 25347-82 (СТ СЭВ 144-75). ЕСДП. Поля допусков и рекомендуемые посадки. Переизд. Декабрь 1986 г. Введ. с 01.07.83 г. М.: Изд-во стандартов, 1987. 51 с.

15. РД 50-635-87. Методические указания. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета. Методы расчета линейных и угловых цепей. Взамен ГОСТ 16319-80, ГОСТ 16320-80, ГОСТ 19415-74, ГОСТ 19416-74. Введ. с 01.07.88. М.: Изд-во стандартов, 1987. 45 с.

16. Бородачев Н.А. Обоснование методики расчета допусков и ошибок кинематических цепей. Ч. I. М.: АН СССР, 1943. 158 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
I. Общая методика точностного расчета приборов	3
II. Расчет размерных цепей	6
I. Общие сведения	6
2. Методы достижения точности замыкающего звена (РД 50-635-87)	10
3. Задачи и методы расчета размерных цепей (РД 50-635-87)	10
4. Обозначение размеров и отклонений (РД 50-635-87 и ЕСДП СЭВ)	11
5. Расчетные коэффициенты	15
6. Порядок построения РЦ	16
7. Основные расчетные формулы	17
8. Расчет РЦ по методу максимума-минимума	19
9. Расчет РЦ по вероятностному методу [I, 2, 5, 6]	35
10. Примеры расчета РЦ	41
III. Расчет точности приборов по физическим параметрам	44
Литература	49

Редакция заказной литературы

Руслан Михайлович Гоцеридзе, Закир Фатихович Уразев

Методы обеспечения точности сборки приборов

Заведующая редакцией Н.Г.Ковалева

Редактор О.М.Королева

Корректор Л.И.Малгина

Подписано в печать 17.08.92. Формат 60x84/16. Бумага тип. № 2.
Печ.л. 3,25. Усл.печ.л. 3,02. Уч.-над.л. 2,69. Тираж 200 экз.
Над. № 68. Заказ № 474 С 275

Издательство МГУ, типография МГУ.
107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5.