

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

**О. Д. Некрасов**

**РОЗМІРНИЙ АНАЛІЗ СКЛАДАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ  
В АВІАДВИГУНОБУДУВАННІ**

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2021

УДК 621.452.32.03.002 (075.8)

Н48

Рецензенти: канд. техн. наук, доц. О. М. Мунгієв,  
Є. В. Прокопенко

**Некрасов, О. Д.**

Н48 Розмірний аналіз складальних конструкцій в авіадвигунобудуванні [Текст] : навч. посіб./ О. Д. Некрасов. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. – 40 с.

ISBN 978-966-662-799-8

Викладено основи конструкторсько-технологічних розрахунків складальних розмірних ланцюгів, розглянуто методи розрахунку допусків ланок складальних ланцюгів, методи забезпечення заданої точності в авіадвигунобудуванні.

Наведено методики практичного розв'язання прямої (конструкторської) задачі, для якої задано параметри замикальної ланки і потрібно визначити параметри ланок, а також особливості розв'язання оберненої (технологічної) задачі.

Для студентів спеціальності «Технологія виробництва авіаційних двигунів» при вивченні курсу «Технологія складання і випробування авіаційних двигунів», а також при виконанні розрахунково-графічних робіт, курсових і дипломних проектів, випускних робіт магістрів.

Іл. 8. Табл. 6. Бібліогр.: 5 назв

УДК 621.452.32.03.002 (075.8)

ISBN 978-966-662-799-8

© Некрасов О. Д., 2021  
© Національний аерокосмічний  
університет ім. М. Є. Жуковського  
"Харківський авіаційний інститут", 2021

## 1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

При конструюванні механізмів і машин, проектуванні технологічних процесів, виборі засобів і методів вимірювань виникає необхідність у проведенні розмірного аналізу для правильного співвідношення взаємозв'язаних розмірів і визначення допусків.

Кожен складальний параметр задають двома допустимими граничними значеннями, різниця яких являє собою допустиму похибку  $\delta_{\Delta}$  (допуск) складання за цим параметром.

У результаті складання сумарна похибка (поле розсіювання  $\omega$ ) складального параметра буде більше або менше, або дорівнюватиме заданому допустимому значенню  $\delta_{\Delta}$ . Для забезпечення заданої точності параметра необхідно, щоб сумарна похибка була менше або дорівнювала заданому значенню, тобто виконувалася умова  $\omega_{\Delta} \leq \delta_{\Delta}$ . Оскільки в розрахунки вводять не дійсні, а допустимі відхилення складових ланок, то умову забезпечення заданої точності можна записати у вигляді

$$\delta'_{\Delta} \leq \delta_{\Delta},$$

де  $\delta'_{\Delta}$  – розрахункове (очікуване) значення точності.

Більшість розрахунків при складанні авіаційних двигунів пов'язана з геометричними параметрами. Розрахунки точності геометричних параметрів основані на теорії розмірних ланцюгів.

Розмірний ланцюг – це сукупність розмірів, що утворюють замкнутий контур і безпосередньо використовуються при вирішенні поставленого завдання. Замкнутість розмірного ланцюга призводить до того, розміри, які входять до нього, не можна призначати незалежно, тобто значення і точність, принаймні, одного з розмірів визначаються іншими.

Розміри, що утворюють розмірний ланцюг, називаються ланками. Ланкою розмірного ланцюга можуть бути будь-які лінійні кутові параметри: діаметральні розміри, відстань між поверхнями або осями, зазори, натяг, відхилення форми розташування осей і поверхонь і т.д.

Будь-який розмірний ланцюг має одну вихідну (замикальну) ланку і дві або більше складових ланки. Вихідною називається ланка, до якої ставлять основні вимоги точності, що характеризують якість виробу відповідно до технічних умов. При складанні виробу ланку нумерують останньою, замикаючи розмірний ланцюг. Така ланка називається замикальною. Таким чином, замикальна ланка безпосередньо не виробляється, а являє собою результат виготовлення всіх інших ланок ланцюга.

Складові ланки розмірного ланцюга поділяють на дві групи. До першої групи належать ланки, зі збільшенням яких (за інших постійних) збільшується і

замикальна ланка. Такі ланки називаються збільшувачими. До другої – належать ланки, зі збільшенням яких зменшується замикальна ланка. Такі ланки називаються зменшувачими.

При різних умовах оброблення заготовок розсіювання їх розміри (згодом ланки розмірного ланцюга) підпорядковуються різним математичним законам. У технології машинобудування велике практичне значення мають такі закони: нормального розподілу (закон Гаусса); рівнобедреного трикутника (закон Сімпсона); ексцентриситету (закон Релея); рівної імовірності і функції розподілу, що являють собою комбінації цих законів.

Залежно від етапу, на якому вирішують проблеми забезпечення точності виробу (проектування, виготовлення), можна виконувати пряму (конструкторську) і обернену (технологічну) задачу.

## 2. РОЗРАХУНКИ СКЛАДАЛЬНИХ РОЗМІРНИХ ЛАНЦЮГІВ

### 2.1. Основні розрахункові формули

Номінальний розмір замикальної ланки розмірного ланцюга визначають за формулою

$$A\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i} A_i, \quad (2.1)$$

де  $i = 1, 2, \dots, m$  – порядковий номер ланки;

$\xi_{A_i}$  – передавальне відношення ланки розмірного ланцюга.

Для ланок, повернених відносно координатних осей, передавальними відношеннями є тригонометричні функції, які використовують при проектуванні складових ланок на відповідні координатні осі.

Таким чином, зміст передавального відношення і його величину слід визначати, враховуючи розв'язувану задачу, особливості розмірного ланцюга і його складових ланок.

Координату середини поля допуску  $\Delta_{0\Delta}$  замикальної ланки обчислюють так:

$$\Delta_{0\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta_{0_i}, \quad (2.2)$$

де

$$\Delta_{0_i} = \frac{\Delta_{e_i} + \Delta_{n_i}}{2};$$

$$\Delta_{0_i} = \frac{\Delta_{e_i} + \Delta_{n_i}}{2}.$$

Допуск замикальної ланки  $\delta'\Delta$  знаходять таким чином:  
 - методом максимуму-мінімуму:

$$\delta_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| \delta_i, \quad (2.3)$$

де

$$\begin{aligned} \delta_{\Delta} &= \Delta_{e_{\Delta}} - \Delta_{n_{\Delta}}, \\ \delta_i &= \Delta_{e_i} - \Delta_{n_i}; \end{aligned}$$

- імовірнісним методом:

$$\delta'_{\Delta} = t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 \delta_i^2}. \quad (2.4)$$

Коефіцієнт ризику  $t_{\Delta}$  вибирають з таблиць значень функції Лапласа  $\Phi(t)$  залежно від прийнятого ризику  $P$ .

При нормальному законі розподілу відхилень і рівноймовірному їх виході за обидві межі поля допуску значення  $P$  пов'язане із значенням  $\Phi(t)$ :

$$P = 100[1 - 2 \cdot \Phi(t)]\%.$$

Значення коефіцієнта  $t_{\Delta}$  наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

P, %	32,00	10,00	4,50	1,00	0,27	0,10	0,01
$t_{\Delta}$	1,00	1,65	2,00	2,57	3,00	3,29	3,89

Відносне середньоквадратичне відхилення

$$\lambda_i = \frac{2\sigma_i}{\delta_i},$$

де  $\sigma_i$  – середньоквадратичне відхилення.

Приймаємо:

$\lambda_i^2 = \frac{1}{9}$ , якщо закон розсіювання близький до закону Гаусса;

$\lambda_i^2 = 1/6$ , якщо закон розсіювання близький до закону трикутника;

$\lambda_i^2 = 1/3$ , якщо закон розсіювання невідомий (частіше в умовах дослідного й одиничного виробництва).

Середнє значення допуску складових ланок розраховують:

- методом максимуму-мінімуму:

$$\delta_{\text{сер}} = \frac{\delta_{\Delta}}{\sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i|}; \quad (2.5)$$

- імовірнісним методом:

$$\delta_{\text{сер}} = \frac{\delta_{\Delta}}{t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2}}. \quad (2.6)$$

Граничні відхилення ланки:

$$\Delta_{B_i} = \Delta_{0_i} + \frac{\delta_i}{2}; \quad (2.7)$$

$$\Delta_{H_i} = \Delta_{0_i} - \frac{\delta_i}{2}. \quad (2.8)$$

Координату середини поля допуску замикальної ланки знаходять так:

$$\Delta_{\delta_{\Delta}} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta_{\delta_i}. \quad (2.9)$$

Координата центра групування відхилень останньої ланки

$$M(x)_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \left( \xi_i \Delta_{\delta_i} + \alpha_i \frac{|\xi_i| \delta_i}{2} \right). \quad (2.10)$$

Коефіцієнт відносної асиметрії ланки

$$\alpha_i = \frac{M(x_i) - \Delta_{\delta_i}}{\frac{\delta_i}{2}}. \quad (2.11)$$

Найбільша можлива компенсація

$$\delta_{\kappa} = \delta'_{\Delta} - \delta_{\Delta}, \quad (2.12)$$

величина поправки

$$\Delta_{\kappa} = \frac{\delta_{\kappa}}{2} + \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta'_{0_i} - \Delta_{0_{\Delta}}. \quad (2.13)$$

Кількість ступенів нерухомих компенсаторів

$$N = \frac{\delta'_{\Delta}}{\delta_{\Delta} - \delta_{\text{комп}}}, \quad (2.14)$$

де  $\delta_{\text{комп}}$  – допуск на виготовлення нерухомого компенсатора.

Існує тісний зв'язок між способами розрахунку розмірних ланцюгів і методами складання. Кожному методу складання відповідає певний спосіб розрахунку розмірних ланцюгів.

## 2.2. Лінійні розмірні ланцюги

Лінійний розмірний ланцюг – це розмірний ланцюг, ланками якого є лінійні розміри. В цьому випадку передавальні відношення такі:

$\xi_i = 1$  – для збільшуючих складових ланок;

$\xi_i = -1$  – для зменшуючих складових ланок.

Для розрахунку допуску замикальної ланки використовують два способи розрахунку:

1. Максимум-мінімум – враховують тільки граничні відхилення ланок розмірного ланцюга і найнесприятливіші їх поєднання. При цьому допуск замикальної ланки дорівнює арифметичній сумі допусків складових ланок:

$$\delta_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \delta_i.$$

2. Імовірнісний – враховують розсіювання розмірів і характер різних сполучень відхилень складових ланок розмірного ланцюга. Величину допуску замикальної ланки відповідно до теорем про підсумовування випадкових величин

визначають шляхом квадратичного підсумовування. Якщо закони розсіювання близькі до закону Гаусса, то

$$\delta_{\Delta}^1 = \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \delta_i^2} . \quad (2.15)$$

У загальному випадку, коли закони розсіювання відрізняються від закону Гаусса і поля розсіювання не збігаються з полями допусків ланок, допуск замикальної ланки визначають за формулою

$$\delta_{\Delta}^1 = t \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 \delta_i^2} . \quad (2.16)$$

Нижче наведено числовий розрахунок очікуваної точності осьового зазору останнього ступеня компресора ТРД, виконаний методами максимуму-мінімуму й імовірнісним.

**Приклад.** Забезпечити осьовий зазор останнього  $A_{\Delta}$  ступеня компресора ТРД (рис. 2.1).

На рис. 2.1 показано розмірний ланцюг, ланки якого мають такі значення:

$$A_1 = 200^{+0,09} \text{ мм}; A_2 = 48 \pm 0,2 \text{ мм}; A_3 = 20,5 \pm 0,15 \text{ мм}; A_4 = 28_{-0,28} \text{ мм}; \\ A_5 = 152 \pm 0,1 \text{ мм}; A_6 = 3,2_{-0,48} \text{ мм}; A_7 = 40^{+0,1} \text{ мм}; A_8 = 0,3_{-0,04} \text{ мм}.$$

Осьовий зазор підшипника становить 0,1...0,3 мм, тобто можна вважати, що

$$A_9 = 0_{+0,1}^{+0,3} \text{ мм}.$$

Заданий зазор  $A_{\Delta} = 2...6$  мм.

Розв'язавши розмірний ланцюг у номіналах, отримаємо номінальне значення зазору:

$$A_{\Delta} = A_1 + A_2 - (A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8 + A_9) = 4 \text{ мм}.$$

1. Виконаємо розрахунок методом максимуму-мінімуму.

Визначимо максимальне і мінімальне значення замикальної ланки:

$$A_{\Delta \text{ верх}} = 200,09 + 48,2 - (20,35 + 27,72 + 151,9 + 3,152 + 40 + 0,26 + 0,1) = 4,808 \text{ мм};$$

$$A_{\Delta \text{ ниж}} = 200 + 47,8 - (20,65 + 28 + 152,1 + 3,2 + 40,1 + 0,3 + 0,3) = 3,15 \text{ мм}.$$

Звідси випливає, що допуск на замикальну ланку

$$\delta A_{\Delta} = A_{\Delta \text{ верх}} - A_{\Delta \text{ ниж}} = 4,808 - 3,15 = 1,658 \text{ мм}.$$

2. Виконаємо розрахунок імовірнісним методом, вважаючи, що розташування відхилень у полях допусків за законом Гаусса є симетричним.

Визначимо допуск замикальної ланки:

$$\delta_{\Delta} = 3 \sqrt{\frac{1}{9} (0,09^2 + 0,4^2 + 0,3^2 + 0,28^2 + 0,2^2 + 0,048^2 + 0,1^2 + 0,04^2 + 0,2^2)} = 0,656 \text{ мм},$$



а також і координату середини поля допуску:

$$\Delta_0 A_{\Delta} = 0,045 - (-0,14 - 0,024 + 0,05 - 0,02 + 0,2) = -0,021 \text{ мм.}$$

Визначимо граничні значення замикальної ланки:

$$A_{\Delta \text{верх}} = 4 - 0,021 + 0,328 = 4,307 \text{ мм;}$$

$$A_{\Delta \text{ниж}} = 4 - 0,021 - 0,328 = 3,651 \text{ мм.}$$

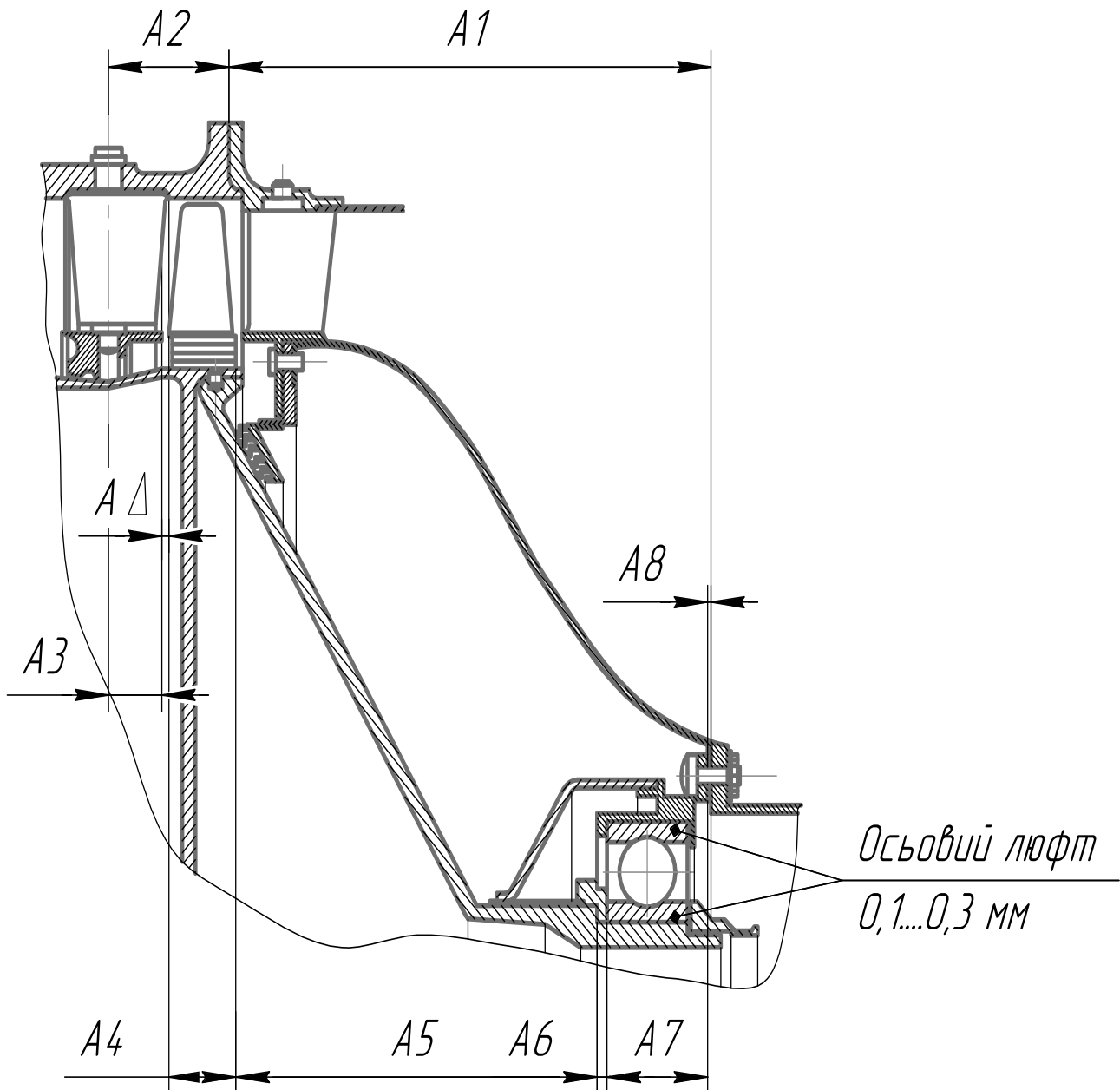


Рис. 2.1. Схема розмірного ланцюга для розрахунку осьового зазору компресора

Таким чином, граничні значення осьового зазору при розрахунку першим методом становлять 4,808 і 3,15 мм, другим – 4,307 і 3,651 мм. Отже, межі змінення цього зазору (2...6 мм) задано без достатніх підстав.

При заданих допусках на розміри складових ланок цей зазор можна витримувати в більш вузьких межах.

Очевидною є можливість розв'язання прямої задачі. Якщо значення осьового зазору задано обґрунтовано, то допуски на виготовлення деталей, що входять в дану складальну одиницю, можуть бути розширені, у результаті буде отримано певний економічний ефект.

### 2.3. Площинні розмірні ланцюги

Виконаємо розрахунок плоских розмірних ланцюгів так само, як і для лінійних розмірних ланцюгів. Для цього необхідно попередньо привести площинний розмірний ланцюг до лінійного вигляду шляхом заміни складових ланок їх проекціями на напрямку, паралельний до напрямку замикальної ланки. У зв'язку з цим схема площинного розмірного ланцюга (рис. 2.2) буде мати вигляд лінійного розмірного ланцюга.

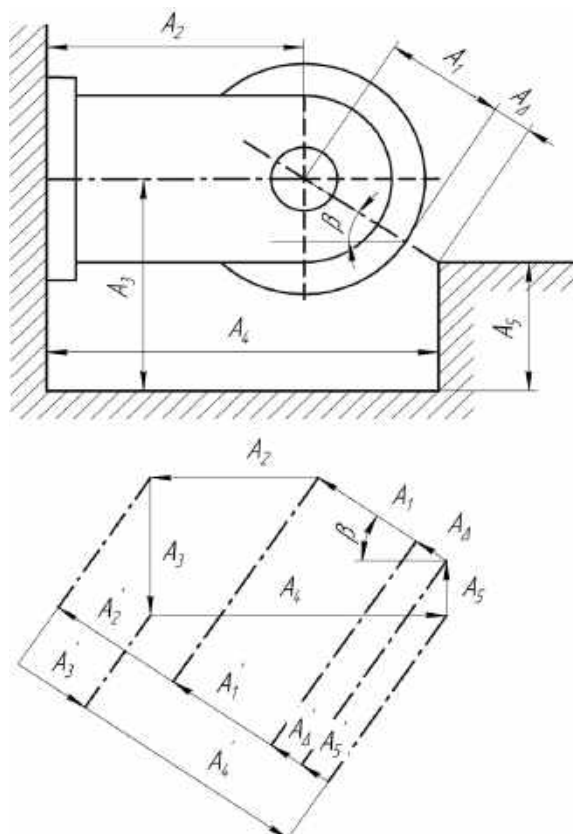


Рис. 2.2. Схема площинного складального розмірного ланцюга

Розрахункове рівняння номінального значення замикальної ланки

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \cos \beta_i A_i. \quad (2.17)$$

Допуск замикальної ланки при розрахунку методом максимуму-мінімуму

$$\delta_{\Delta} = \sum_{i=1}^n \delta_i \cos \beta_i. \quad (2.18)$$

При розрахунку розмірних ланцюгів імовірнісним методом

$$\delta_{\Delta} = t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^n \lambda_i^2 \delta_i^2 \cos^2 \beta_i}. \quad (2.19)$$

**Приклад.** Визначити для площинного розмірного ланцюга (див. рис. 2.2) номінальний розмір  $A_{\Delta}$  і допуск  $\delta_{\Delta}$  замикальної ланки.

Задано:  $A_1 = 30 \pm 0,05$  мм;

$A_2 = 60 \pm 0,05$  мм;  $A_3 = 60 \pm 0,05$  мм;

$A_4 = 88 \pm 0,05$  мм;  $A_5 = 40 \pm 0,05$  мм;  $\beta = 30^{\circ}$ .

Зі схеми розмірного ланцюга (див. рис. 2.2) випливає, що ланки  $A_3$  і  $A_4$  – збільшуючі, а ланки  $A_1$ ,  $A_2$  і  $A_5$  – зменшуючі.

З формули (2.17) маємо

$$A_{\Delta} = (A_3 \cos 60^{\circ} + A_4 \cos 30^{\circ}) - (A_1 \cos 0^{\circ} + A_2 \cos 30^{\circ} + A_5 \cos 60^{\circ});$$

$$A_{\Delta} = (60 \cdot 0,5 + 88 \cdot 0,87) - (30 + 60 \cdot 0,87 + 40 \cdot 0,5) = 3,8 \text{ мм.}$$

Методом максимуму-мінімуму допуск замикальної ланки розраховують за рівнянням (2.18):

$$\delta_{\Delta} = 0,1 + 0,4 \cdot 0,87 + 0,4 \cdot 0,5 + 0,6 \cdot 0,87 + 0,2 \cdot 0,5 = 1,25 \text{ мм.}$$

Отже,  $A_{\Delta} = 3,8 \pm 0,63$  мм.

При розрахунку імовірнісним методом, вважаючи, що є справедливим симетричний розподіл відхилень у полях допусків за законом Гаусса,  $\delta_{\Delta}$  дає такі результати:

$$\delta_{\Delta} = 3 \sqrt{\frac{1}{9} (0,1^2 + 0,4^2 \cdot 0,87^2 + 0,4^2 \cdot 0,5^2 + 0,6^2 \cdot 0,87^2 + 0,2^2 \cdot 0,5^2)} = \sqrt{0,45} = 0,66 \text{ мм.}$$

Таким чином,  $A_{\Delta} = 3,8 \pm 0,33$  мм.

Якщо кут  $\beta$  задано з допуском, то при визначенні допуску замикальної ланки необхідно враховувати додаткову похибку, що вноситься кожною складовою ланкою від помилки кута  $\beta$ . Зазвичай допуск на кут розподіляється симетрично, тому координата середини поля допуску кута дорівнює нулю і не впливає на величини проєкцій координат середин полів допусків складових ланок.

## 2.4. Векторні розмірні ланцюги

Допустимі похибки належать до скалярних величин (лінійних розмірів) або перетворюються на лінійні. Такі похибки, як ексцентриситет, торцеве биття, неспіввісність, є векторними. Вони відрізняються тим, що у них є випадковими не тільки величини (модулі), а й напрямки, що змінюються в межах  $2\pi$ . Розраховують їх імовірнісним методом. Розрахунок методом максимуму-мінімуму буде виправдано лише при такому малоймовірному випадку, коли складові похибки мають граничні значення і один напрямок.

Так, при розрахунках радіальних зазорів у компресорі турбіни ГТД, враховуючи, що векторні похибки розподілені на паралельних площинах, перпендикулярних до осі ротора, а сумарний вектор направлено рівномірно у межах від 0 до  $2\pi$ , допуск замикальної ланки векторного ланцюга можна визначити за формулою

$$\delta^1_{\Delta} = t_B \sqrt{\sum_1^{n-1} \xi_{Bi}^2 \lambda_{Bi}^2 \delta_i^2}, \quad (2.20)$$

де  $t_B$  – коефіцієнт, що дорівнює 3,6 при ризику 0,15%, характеризує відсоток виходу розрахункової величини за межі поля допуску (відсоток ризику) для закону розсіювання, близького до закону Релея;  $\xi_{ei}$  – коефіцієнт впливу для складових векторів, розташованих в одній площині (або у паралельних площинах), що дорівнює 1;  $\lambda_{ei}$  – коефіцієнт відносного розсіювання модуля складових векторних похибок для закону, близького до закону Релея, що дорівнює  $\lambda_i^2 = 1/13$ ;  $\delta_i$  – складова векторна похибка.

Таким чином, для практичних розрахунків можна користуватися спрощеним рівнянням

$$\delta^1_{\Delta} = 3,6 \sqrt{\sum_1^{n-1} \frac{1}{13} \delta_i^2} = \sqrt{\sum_1^{n-1} \delta_i^2}. \quad (2.21)$$

При розрахунках векторних похибок роторних машин слід урахувувати, що при обертанні ротора модуль його сумарної векторної похибки збігається (один раз за оборот) з модулем сумарної векторної похибки статора. Тому векторні похибки ротора і статора визначають окремо (з урахуванням законів розсіювання складових похибок), а потім підсумовують їх.

На рис. 2.3 показано частину компресора ГРД і вихідні дані, необхідні для розрахунку точності радіального зазору. Індексом «в» і «о» позначено діаметри охоплених і охоплюючих поверхонь в сполученнях. Числові значення основних розмірів і посадки:

$$\varnothing D = 568,5_{-0,12}; \varnothing E = 576 \frac{H7}{h6}; \varnothing Z = 250 \frac{H7}{h6}; \varnothing K = 160H6; \varnothing L = 90js5.$$

Номінальний розмір замикальної ланки (радіального зазору  $A_{\Delta}$ ) розраховують так само, як і для лінійних ланцюгів з паралельними ланками для цього виробу:  $A_{\Delta} = 1,0$  мм.

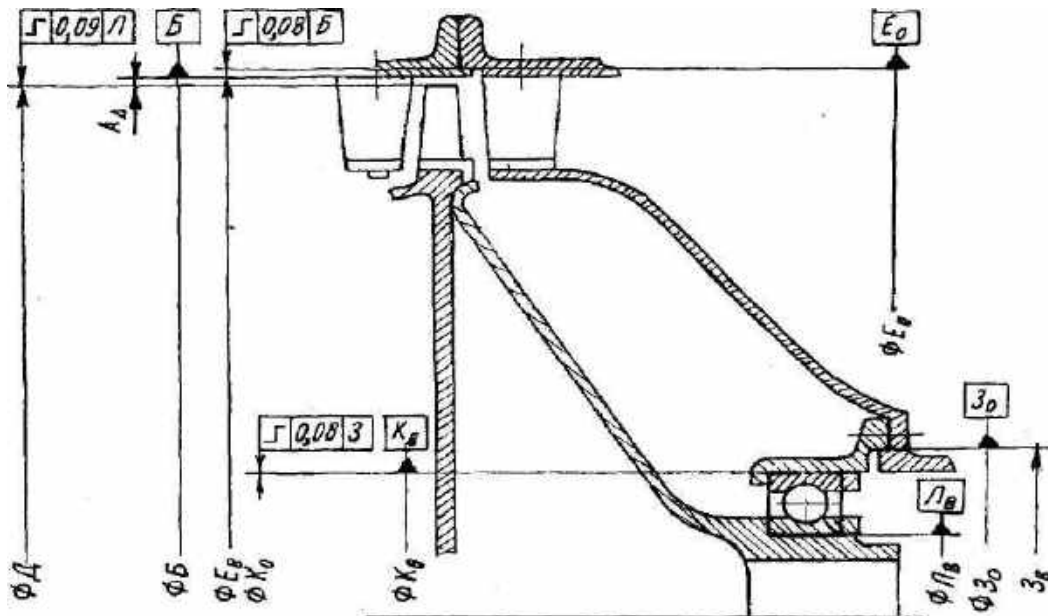


Рис. 2.3. Розмірний ланцюг для розрахунку радіального зазору

Для визначення (або перевірки) допуску замикальної ланки скористаємося рівнянням

$$\delta'_{\Delta} = 3,6 \sqrt{\sum_1^{n-1} \frac{1}{13} \delta_i^2} = \sqrt{\sum_1^{n-1} \delta_i^2}. \quad (2.22)$$

Допуски складових ланок:

а) на взаємне положення базових (робочих) поверхонь деталей ротора і статора, що входять як ланки до векторного ланцюга (див. рис. 2.3); на неспіввісність поверхонь Д і Л<sub>в</sub>, Е<sub>в</sub> і Б і т.д., числові значення яких  $\delta_{ДЛ_в} = 0,09$  мм,  $\delta_{Е_0З_в} = \delta_{Е_вБ} = \delta_{З_0К_0} = 0,08$  мм. Для виробничих розрахунків величини, що характеризують точність виготовлення деталей (друга характеристика), вибирають з конструкторської або технологічної документації (креслення, операційні карти);

б) відхилення від співвісності поверхонь, які є результатом взаємного переміщення деталей у межах радіальних зазорів у сполученнях. Величини цих відхилень залежать від виду посадки і методів складання, їх вказують у складальних кресленнях. За розрахункову величину неспіввісності для цього типу

сполучень беремо 0,5 максимального значення зазору. Для посадок в розглянутому виробі розрахункові величини неспіввісності такі:

$$\delta_{E_O E_B} = 0,114 \times 0,5 = 0,057 \text{ мм}; \quad \delta_{3_O 3_B} = 0,075 \times 0,5 = 0,038 \text{ мм};$$

$$\delta_{K_O K_B} = 0,065 \times 0,5 = 0,033 \text{ мм};$$

в) радіальні зазори в кулькових і роликів підшипниках, зазначені в їхніх паспортах або картах контролю. При посадці одного з кілець підшипника з натягом враховують зміну (зменшення) початкового радіального зазору. В цьому випадку приймемо, що радіальний зазор при посадці внутрішнього кільця кулькового підшипника з натягом зменшується на 0,5 величини натягу. Для використовуваного підшипника (типу 1 16218 У) радіальний зазор після посадки

$$\delta_n = 0,04 - (0,032 \times 0,5) = 0,024 \text{ мм.}$$

Таким чином, розрахункову величину допуску замикальної ланки подано у вигляді суми складових похибок ротора (від 1 до m) і статора (від n + 1 до m - 1):

$$\delta'_\Delta = \sqrt{\sum_1^n \delta_i^2} + \sqrt{\sum_{n+1}^{m-1} \delta_i^2}; \quad (2.23)$$

$$\delta'_\Delta = \sqrt{\delta_{ДЛ_B}^2 + \delta_{II}^2} + \sqrt{\delta_{E_B B}^2 + \delta_{E_O 3_B}^2 + \delta_{3_O K_O}^2 + \delta_{E_O E_B}^2 + \delta_{3_O 3_B}^2 + \delta_{K_O K_B}^2} =$$

$$= \sqrt{0,09^2 + 0,024^2} + \sqrt{3 \cdot 0,08^2 + 0,057^2 + 0,038^2 + 0,033^2} =$$

$$= 0,093 + 0,158 = 0,25 \text{ мм.}$$

### 3. МЕТОДИ ДОСЯГНЕННЯ ЗАДАНОЇ ТОЧНОСТІ

#### 3.1. Метод повної взаємозамінності

Розрахунки  $\delta_\Delta^1$  проводили методом максимуму-мінімуму. Було встановлено, що умова  $\delta_\Delta^1 \leq \delta_\Delta$  виконується. Складання можна здійснювати методом повної взаємозамінності. Повна взаємозамінність – це властивість складальних елементів одного й того ж самого найменування строго займати свої місця в об'єкті складання без виконання допоміжних операцій та автоматично забезпечувати задану точність складання.

На основі цього будь-які придатні деталі та інші складальні елементи одного найменування виготовленої партії в будь-яких взаємних поєднаннях відповідають

один одному і створюють задані складальні параметри. До складального комплексу входять елементи з наявної партії (їх не підбирають при комплектуванні). При методі повної взаємозамінності не виконуються такі супутні операції: підбір, підганяння, регулювання, попереднє складання, іноді контроль. У цьому випадку складання відрізняється простотою і високою продуктивністю, оскільки виконують тільки з'єднання і закріплення між собою складальних елементів (тобто складальні роботи).

### 3.2. Метод неповної взаємозамінності

В основу методу покладено теорію імовірності, за якою крайні величини ланок розмірних ланцюгів зустрічаються рідше, ніж середні. Цей метод застосовують, коли не виконується умова  $\delta_{\Delta}^1 \leq \delta_{\Delta}$ , що є наслідком розширення допусків на деталі до економічно прийнятних значень для виробництва. Унаслідок цього деякий відсоток виробів, складених, як і при методі повної взаємозамінності, має значення замикальної ланки більшого допуску. Однак, якщо відсоток браку невеликий, а економічний ефект від зниження собівартості виготовлення деталей окупає витрати через перебирання і виправлення дефектів, то застосування цього способу є доцільним. Економічна ефективність обґрунтовується імовірнісним способом розрахунку (математичною залежністю теорії імовірності) і задається прийнятним відсотком ризику. У багатоланковому механізмі потрібно витримати допуск замикальної ланки  $\delta_{\Delta} = \pm 0,03$  мм (рис. 3.1, крива 1).

Припустимо, що в цих виробничих умовах неможливо обробити деталі з точністю, необхідною для забезпечення такого малого допуску при складанні без вибору або зміни розміру. Після збільшення допусків на розміри деталей до економічно прийнятних граничні відхилення замикальної ланки (при складанні без вибору або зміни розмірів) збільшуються до  $\pm 0,05$  мм (рис. 3.1, крива 2). Оскільки вони не відповідають технічним вимогам, то для подальшого аналізу було прийнято метод неповної взаємозамінності.

Заштриховані площинки під кривою Гаусса, що виходять за межі допуску  $\delta_{\Delta}$ , характеризують відсоток ризику (відсоток некондиційних складальних одиниць), що визначають за формулами теорії імовірності.

Для спрощення розрахунків можна користуватися заздалегідь складеними таблицями. Нижче наведено можливий відсоток ризику залежно від коефіцієнта

взаємозамінності  $\eta = \frac{\delta_{\Delta}}{\delta_{\Delta 1}}$ , де  $\delta_{\Delta}$  – заданий допуск замикальної ланки;

$\delta_{\Delta 1}$  – допуск замикальної ланки, що утворився після збільшення допусків на розміри складових ланок до економічно прийнятних:

Відсоток ризику	0,27	0,6	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	33,0
Коефіцієнт $\eta$	1	0,9	0,86	0,78	0,68	0,63	0,58	0,53	0,33

У цьому прикладі, де  $\eta = 0,6$ , відсоток ризику становитиме  $\sim 7\%$ .

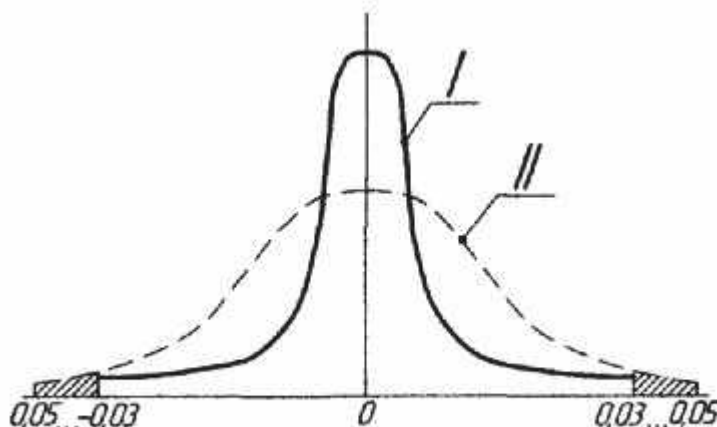


Рис. 3.1. Криві нормального розподілу розмірів замикальної ланки

Некондицію деяких виробів можна усунути шляхом перебирання і виправлення дефектів. Крім того, з деяких виробів знімають придатні складальні елементи і використовують їх при складанні інших виробів. Для отримання економічного ефекту необхідно, щоб зменшення вартості виготовлення деталей унаслідок збільшення на них допусків окупало брак при складанні. Складання при неповній взаємозамінності супроводжується 100%-вим контролем складальних одиниць.

### 3.3. Метод підбору

Метод підбору передбачає забезпечення при складанні заданих складальних параметрів шляхом введення в об'єкт складання (в його комплект) таких складальних елементів, які відповідають один одному за розмірами, масою, пружністю або іншими параметрами. Деталі при методі підбору обробляють з економічно прийнятними допусками. Отже, якщо в цьому випадку не виконувати підбір складальних елементів, то у результаті складання можуть бути отримані некондиційні вироби. Метод підбору можна застосовувати в будь-якому типі виробництва, крім одиничного.

Розрізняють попарний і груповий підбори. При попарному підборі один складальний елемент підбирають до іншого (шляхом пошуку, перегляду) доти, доки не буде знайдено потрібну пару сполучених складальних елементів, що забезпечує задані складальні технічні вимоги. Це багатоваріантна задача, оскільки знаходять потрібне поєднання складальних елементів. Попарний підбір



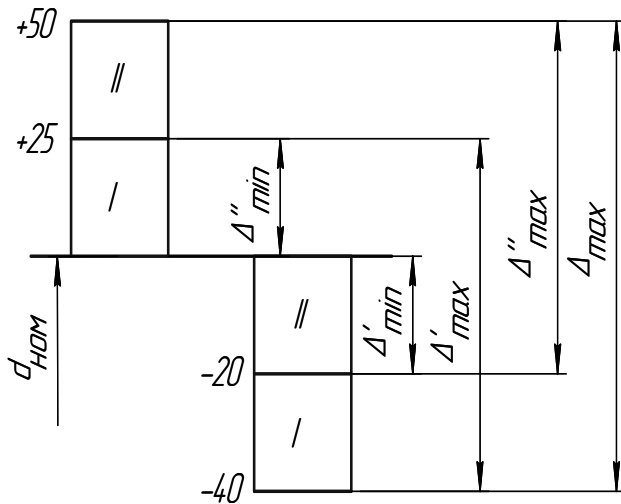
виконують комплектувальники при створенні комплекту майбутнього виробу або складанні. У другому випадку слід мати кілька однойменних складальних елементів, щоб вибрати з них потрібні пари. Полегшити пошук необхідних складальних елементів, які мають увійти у цей виріб, можна за допомогою карти обмірів відповідних параметрів деталей, що заповнюють контролери під час приймання деталей після їх виготовлення. Попарний підбір, що виконується складальниками, збільшує трудомісткість, яка впливає на собівартість складання, а також зменшує його продуктивність.

Метод групового підбору передбачає поділ перед складанням на групи сполучених однойменних складальних елементів, виготовлених у межах економічно прийнятних допусків, і проведення складання деталей однакових груп. Це дає змогу підвищити точність складання без посилення допусків на виготовлення деталей. Користуючись груповим підбором, можна уникнути зазорів або натягів на нижніх і верхніх межах і підвищити якість складання, термін служби машин і техніко-економічні показники виробництва. Груповий підбір може бути повним і частковим. При повному груповому підборі всі складальні елементи поділяють на групи, а потім складальні одиниці згруповують з елементів відповідних груп. При цьому точність складального параметра збільшується в стільки разів, на скільки груп поділено складальні елементи, що з'єднуються. Це пояснюється тим, що складальні елементи, що входять до групи, мають допуски на параметри (групові допуски) у стільки разів менше, на скільки груп вони поділені. Цим технологічним прийомом вдається немов збільшити точність виготовлення деталей без фактичного посилення допусків і, отже, вплинути на точність складання. На рис. 3.2 показано з'єднання, отримане без підбору його елементів із груповим підбором (поділені на дві групи), і визначена точність створюваного зазору.

Метод повного групового підбору називають методом групової взаємозамінності, оскільки складання в межах певних груп є аналогічним методу повної взаємозамінності. Складання методом повного групового підбору називається селективним, тобто з використанням складальних елементів, попередньо поділених на групи. Зазвичай класифікацію деталей на групи виконують контролери під час їх приймання. Цей метод застосовують при складанні малозвенних складальних одиниць.

При частковому груповому підборі тільки одну з деталей (складальних елементів) сполучення сортують на групи. Невідсортовані деталі сполучення складальник обмірює на робочому місці, іноді безпосередньо в складальному об'єкті після їх монтажу, а потім за результатами цих вимірів визначає групу деталі. Цей метод застосовують при складанні багатоланкових складальних одиниць. Складання з неповним груповим підбором називається напівселективним. Розсортовані на групи складальні елементи маркують і зберігають в спеціальній тарі, щоб уникнути їх змішування. Деталі й інші складальні елементи підбирають вручну граничними калібрами і універсальними

вимірювальними інструментами або автоматами. Метод підбору, незважаючи на зменшення вартості деталей, потребує додаткових витрат коштів і часу. При цьому передбачають виготовлення зайвих комплектів деталей, необхідних при створенні запасу деталей для підбору, що спричиняє іноді підвищення витрат на виготовлення продукції, особливо в дрібносерійному виробництві.



а

Метод складання	Група	Найбільший зазор, МКМ	Найменший зазор, МКМ	Допуск зазору, МКМ
Без підбору	-	$\Delta_{max}'' = 90$	$\Delta_{min}'' = 0$	$\delta\Delta = \Delta_{max}'' - \Delta_{min}'' = 90$
3 підбором	I	$\Delta_{max}' = 65$	$\Delta_{min}' = 20$	$\delta\Delta' = 45$
	II	$\Delta_{max}'' = 70$	$\Delta_{min}'' = 25$	$\delta\Delta'' = 45$

б

Рис. 3.2. Груповий підбір:

а – схема повного групового підбору; б – таблиця точності складання

Тому підбір не можна організувати в одиничному виробництві. Метод підбору (порівняно з методом повної взаємозамінності) дає економічний ефект за умови, якщо збільшення вартості складання, контролю й контрольно-вимірювальних засобів буде окупатися в результаті зменшення вартості виготовлення деталей. Це можливо тільки в серійному і масовому виробництвах.

### 3.4. Метод компенсації (регулювання)

Застосовують, якщо виконується умова  $\delta'_\Delta > \delta_\Delta$ . Він полягає в тому, що задане значення допуску замикальної ланки при виготовленні інших з економічно прийнятною точністю досягається шляхом регулювання розміру однієї з деталей, яка називається компенсатором. Усі інші деталі беруть участь в складанні, як і при методі повної взаємозамінності. В авіаційних двигунах усіх типів компенсатори використовують для регулювання найважливіших осьових зазорів в турбіні, компресорі, підшипниках, бічних зазорах конічних шестерень. Місце постановки компенсатора вказує конструктор. Компенсатори можуть змінювати габаритні розміри складальних одиниць і взаємне розташування деталей.

Кількість ступенів нерухомих компенсаторів визначається такою залежністю:

$$N = \frac{\delta'_\Delta}{\delta_\Delta - \delta_{\text{комп}}}$$

де  $\delta_{\text{комп}}$  – допуск на виготовлення нерухомого компенсатора;

$N$  округляють до цілого числа в більший бік.

Перевага методу компенсаторів – висока точність замикальної ланки незалежно від кількості ланок і підтримування її в експлуатації. Компенсатор входить до складу зменшуючих ланок.

### 3.5. Метод припасування

Характеризується тим, що необхідна точність складального параметра досягається при складанні шляхом зміни спряженого розміру поверхні спарувальних деталей у результаті зняття з них шару матеріалу. Для цього на оброблюваній поверхні спеціально створюють допуск на оброблення. Інші деталі з'єднання виготовляють з економічно доцільною для цього виробництва точністю, їх встановлюють в об'єкт складання без припасування. Знімання матеріалу дає змогу компенсувати невелику точність виготовлення деталей, що входять в складальну одиницю. Метод припасування забезпечує точність складання багатоланкових одиниць, в які входить велика кількість деталей, що впливають на величину складального параметра.

При складанні ГТД використовують такі припасувальні операції: притирання, шабрування, розгортання і обпилювання. Можливі також спільне свердління отворів у деталях, нарізування різі та інші операції. Притирання проводять в основному для забезпечення певної герметичності нерухомих і рухомих з'єднань. Притерті поверхні матові, без рисок і засвітлення. Притиральні роботи є досить трудомісткими, тому їх прагнуть по можливості механізувати. Шабрування застосовують для отримання досить рівних поверхонь, що забезпечують необхідну площу контакту сполучених поверхонь деталей. Розгортання необхідне для досягнення заданої посадки циліндричних з'єднань, відновлення потрібної точності і форми отвору тонкостінної деталі типу втулки, запресованої в іншу деталь, а також для забезпечення абсолютної співвісності невеликих отворів деталей, що сполучаються. Обпилювання і зачищення застосовують при знятті грату після зварювання, шару матеріалу з поверхні деталі. Полірування виконують для досягнення меншої шорсткості поверхонь, що піддавалися обпилюванню і зачищенню.

### 3.6. Метод з віртуальним комп'ютерним складанням

Суть методу з віртуальним комп'ютерним складанням полягає в такому:

- перед складанням здійснюють 100 %-вий контроль усіх деталей і визначають усі необхідні для розрахунку параметри;
- отриману інформацію заносять до бази даних ПЕВМ;
- на ПЕВМ на основі розроблених математичних моделей і програмного забезпечення виконують індивідуальний підбір деталей і віртуальне складання двигуна, розглядаючи всі можливі варіанти комплектації і відносного розташування деталей;
- визначають необхідні вихідні параметри якості складання для кожного варіанта, потім вибирають з них ті, які задовольняють заданим обмеженням;
- на робоче місце складальників надходить уже підібраний комплект деталей, що підлягає складанню;
- складальники за розробленою технологією з підбраного комплекту деталей виробляють одноразове **бездовідне** складання.

Метод з віртуальним комп'ютерним складанням дозволяє значно підвищити вимоги до якості виробу.

Метод забезпечує одноразове **бездовідне** складання двигуна. В результаті віртуального складання створюється віртуальний виріб – цифрова математична модель виробу, що враховує всі найбільш істотні властивості й процеси для цього конкретного екземпляра реального виробу. Використання технології віртуальної реальності дає змогу виготовити деталі, скласти з них виріб, визначити необхідні його геометричні та фізичні параметри, виконати, наприклад, віртуальні балансування, випробування, експлуатацію та за результатами оцінити якість варіанта виготовлення.

### 3.7. Вибір методу досягнення заданої точності

Метод досягнення заданої точності замикальної ланки вибирають залежно від допуску, встановленого на неї, і кількості складових ланок розмірного ланцюга з урахуванням конструктивних і технологічних особливостей виробу, його службового призначення, собівартості виготовлення та інших чинників.

Попередньо метод забезпечення заданої точності останньої складової у ланці вибирають за середнім допуском складових ланок. Для цього за номінальними значеннями складових ланок розмірного ланцюга визначають їх середнє значення:

$$A_{\text{сеп}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |A_i|. \quad (3.1)$$

Метод розрахунку розмірного ланцюга використовують залежно від прийнятого методу розрахунку, заданого допуску замикальної ланки і кількості складових ланок ланцюга. Визначають середнє значення допуску  $\delta_{\text{сеп}}$  для кожної ланки:

– під час розрахунку методом максимуму-мінімуму:

$$\delta_{\text{сер}} = \frac{\delta_{\Delta}}{m-1}; \quad (3.2)$$

– під час розрахунку імовірнісним методом:

$$\delta_{\text{сер}} = \frac{\delta_{\Delta}}{1,2\sqrt{m-1}}. \quad (3.3)$$

Отриманий середній допуск або середній квалітет точності складових ланок оцінюють з точки зору виконання їх на виробництві. При цьому враховують складність та габаритні розміри деталей, передбачуваний технологічний процес виготовлення та ін.

Виходячи зі значень величин  $A_{\text{сер}}$  і  $\delta_{\text{сер}}$  знаходять найближчий квалітет точності.

Орієнтовно метод досягнення точності останньої складової ланки можна вибрати за співвідношенням розрахункового (очікуваного) значення точності або виробничого допуску, заданого допуску  $\delta_{\Delta}^1$  цієї ланки і допуску  $\delta_{\Delta}$ , наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Співвідношення між $\delta_{\Delta}$ та $\delta_{\Delta}^1$	Метод досягнення точності для виробництва		
	Одиничного і дрібносерійного	Серійного	Масового
При $m = 3$			
$\delta_{\Delta} / \delta_{\Delta}^1 \geq 1$	Повної взаємозамінності		
$2/3 \leq \delta_{\Delta} / \delta_{\Delta}^1 << 1$	Повної взаємозамінності	Неповної взаємозамінності	
$\delta_{\Delta} / \delta_{\Delta}^1 < 2/3$	Припасування	Групової взаємозамінності	
При $m > 3$			
$\delta_{\Delta} / \delta_{\Delta}^1 \geq 1$	Повної взаємозамінності		
$2/3 \leq \delta_{\Delta} / \delta_{\Delta}^1 < 1$	Припасування	Регулювання	Групової взаємозамінності
$1/3 \leq \delta_{\Delta} / \delta_{\Delta}^1 << 2/3$	Припасування	Регулювання або групової взаємозамінності	Групової взаємозамінності
$\delta_{\Delta} / \delta_{\Delta}^1 < 1/3$	Припасування і регулювання	Регулювання	

#### 4. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ДОПУСКІВ

Розрахунок допусків найбільш часто застосовують при розробленні нових конструкцій машин. Завданням точності аналізу виробів є визначення допусків на складові ланки за заданим допуском замикальної ланки. Існує кілька методів його вирішення: спроб, однакових допусків, однакового квалітету, економічного обґрунтування допусків, пропорційного впливу.

**Метод спроб.** Полягає в тому, що допуски визначають унаслідок багаторазових спроб у такому порядку:

1. На всі складові ланки розмірного ланцюга призначають економічні допуски, враховуючи особливості конструкції виробу, досвід експлуатації, характер їх роботи, прийнятий метод оброблення, а також граничні відхилення.

2. Розраховують допуск за рівняннями (4.3), (4.4) і координату середини поля допуску останньої складової у ланці за рівнянням (4.2).

3. Порівнюють розраховані значення із заданими, які повинні задовольняти рівнянню

$$\delta_{\Delta}^1 \leq \delta_{\Delta}. \quad (4.1)$$

4. Якщо рівняння не задовольняються, то корегують допуски і граничні відхилення всіх або частини складових ланок. Якщо величина  $\delta_{\Delta}^1 > \delta_{\Delta}$ , то для однієї або декількох ланок допуск зменшують до технологічно прийняттого; якщо величина  $\delta_{\Delta}^1 < \delta_{\Delta}$ , то для однієї або декількох ланок, які є технологічно важкими при виготовленні деталей, допуск збільшують. Після цього знову визначають параметр  $\delta_{\Delta}^1$  і порівнюють його із заданим. Спроби продовжують до задоволення рівнянню  $\delta_{\Delta}^1 \leq \delta_{\Delta}$ .

Метод спроб використовують для розрахунку допусків виробів одиничного і дрібносерійного виробництва. Недоліки методу: трудомісткість розрахунків, виконуваних вручну, особливо при великій кількості складових ланок, а також суб'єктивність рішення при виконанні спроб.

Для багатоланкових розмірних ланцюгів, що складаються тільки з ланок (скалярних величин), рекомендується такий порядок розрахунку: на всі складові ланки розмірного ланцюга, крім одного, призначають економічні допуски і граничні відхилення. Визначають допуск з'єднувальної ланки за формулою

$$\delta_{i\Delta} = \delta_{\Delta} - \sum_{i=1}^{m-2} |\xi_i| \delta_i. \quad (4.2)$$

**Метод однакових допусків.** На всі складові ланки призначають однакові допуски. Метод застосовують для розрахунку розмірних ланцюгів, що становлять однотипні ланки, а номінальні розміри мало відрізняються (знаходяться в одному інтервалі) і можуть бути виконані з приблизно однаковою економічною точністю.

Єдиний для всіх розмірів допуск визначають таким чином:

- під час розрахунку ланцюга методом максимуму-мінімуму (3.2);
- під час розрахунку імовірнісним методом (3.3).

Отриманий допуск  $\delta_i$  коригують для деяких складових ланок залежно від їх значення, конструктивних вимог і технологічних труднощів виготовлення, але так, щоб виконувалася умова  $\delta_{\Delta}^1 \leq \delta_{\Delta}$ .

При цьому зазвичай використовують стандартні поля допусків кращого застосування.

Метод однакових допусків простий, але недостатньо точний, оскільки коригування допусків складових ланок є довільним. Його можна рекомендувати тільки для попереднього призначення допусків.

**Метод однакового квалітету.** На всі складові ланки призначають допуски однакового квалітету. Необхідний квалітет вибирають залежно від замикальної ланки, кількості складових ланок і їх номінальних значень.

В основу методу однакового квалітету покладено функціональну залежність допуску від номінального значення ланки. Метод застосовують для розрахунку багатоланкових лінійних ланцюгів.

Порядок розрахунку:

1. При інтервалі значень, в який потрапляє ланка, визначають одиницю допуску  $i_i$  (ГОСТ 25346-82) для кожної такої ланки:

$$i_i = 0,45 \sqrt[3]{\beta_i}, \quad (4.3)$$

де  $\beta_i = 1,001 D_i$  – середньгеометричні значення крайніх розмірів інтервалу,  $D_i = \sqrt{D_{\max} D_{\min}}$ . У табл. 4.1 наведено значення параметра  $i$  для різних інтервалів діаметрів.

2. Визначають кількість одиниць допуску  $a$ :

- під час розрахунку ланцюга методом максимуму-мінімуму:

$$a = \frac{\delta_{\Delta}}{\sum_{i=1}^{m-1} i_i}; \quad (4.4)$$

- під час розрахунку ланцюга імовірнісним методом:

$$a = \frac{\delta_{\Delta}}{t \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} i_i^2 \lambda_i^2}}. \quad (4.5)$$

Таблиця 4.1

Інтервал, мм I, мкм	До 3	Від 3 до 6	Від 6 до 10	Від 10 до 18	Від 18 до 30
	0,55	0,73	0,90	1,08	1,31
Інтервал, мм I, мкм	Від 30 до 50	Від 50 до 80	Від 80 до 120	Від 120 до 180	
	1,56	1,86	2,17	2,52	
Інтервал, мм I, мкм	Від 180 до 250	Від 250 до 315	Від 315 до 400	Від 400 до 500	
	2,89	3,23	3,54	3,89	

Допуски на деякі складові ланки відомі заздалегідь. Так, до розрахункової схеми можуть входити розміри стандартизованих або нормалізованих виробів (наприклад, підшипників кочення, муфт, електродвигунів та ін.), тобто допуски для заданої схеми. Зазори визначають за характером сполучення поверхонь, які обумовлюються службовим призначенням виробу. Отже, допуски на діаметри отвору (розмір паза) і вала (розмір виступу) для цієї схеми також задані.

3. При кількості  $a$  визначають квалітет точності, призначають допуски на всі складові ланки, крім з'єднувальної. Останню слід вибирати ланку з найбільшим номінальним значенням. Якщо отримане під час розрахунку число  $a$  не збігається з табличним, то приймають найближче до нього значення:

<b>Квалітет точності</b>	5	7	9	11	13	15	17
$a$	7	16	40	1100	250	640	11600

Знайдені допуски складових ланок коригують, враховуючи конструктивно експлуатаційні вимоги і можливість економічного виготовлення деталей.

**Метод економічного обґрунтування допусків.** Полягає в тому, що допуски складових ланок призначають таким чином, щоб вартість виготовлення деталей, розміри яких є ланками ланцюга, при заданому допуску замикальної ланки була найменшою. Під час розрахунку допусків необхідно мати дані про витрати на оброблення деталей з різною точністю.

Собівартість виконання операцій  $C_{oi}$  і допуск розміру оброблюваної поверхні  $\delta_i$  зв'язані гіперболічною залежністю (рис. 4.1) так, що при збільшенні допуску вартість оброблення зменшується. На різних ділянках кривої  $C_{oi} = f(\delta_i)$  дотична до неї має різні кути нахилу, що вказує на різну інтенсивність зміни вартості оброблення залежно від допуску.



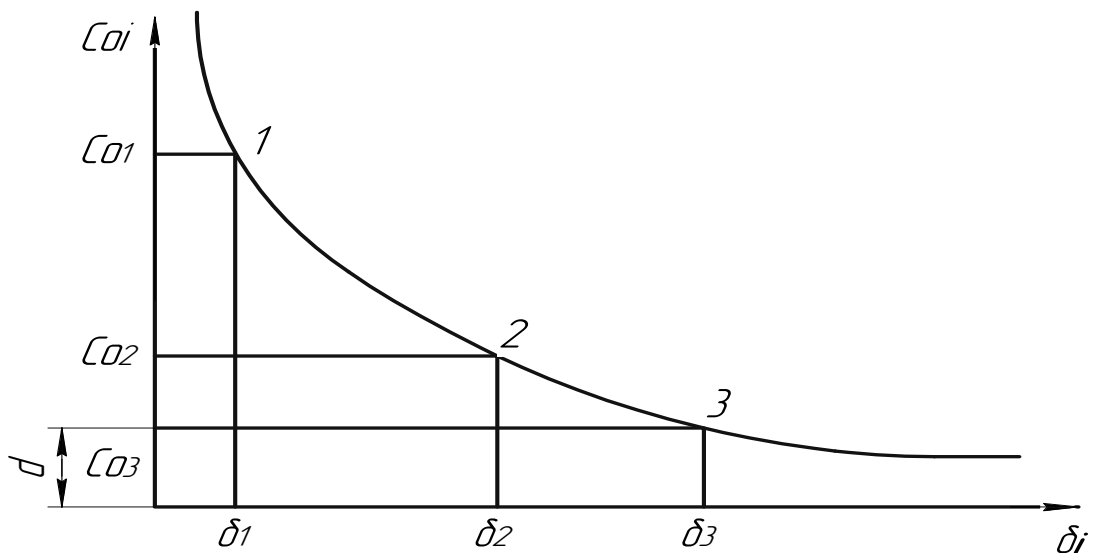


Рис. 4.1. Графік залежності собівартості  $C_{oi}$  технологічної операції від допуску  $\delta_i$

Собівартість виконання технологічної операції  $C_{oi}$  – це функція номінального значення розміру, площі оброблюваної поверхні та інших чинників (матеріал деталі, її конфігурація та ін.).

Конкретний допуск, отриманий унаслідок розрахунку, вибирають залежно від близького до розрахункового квалітету точності, визначеного за ГОСТ 25346-82.

У зв'язку з необхідністю врахування багатьох чинників метод економічного обґрунтування допусків може бути реалізовано на основі принципу оптимізації на ЕОМ. Недоліки методу: складність і трудомісткість, відсутність систематизованих нормативних даних, що пов'язують точність з витратами (собівартістю, трудомісткістю виготовлення), які дозволили б скласти відповідну цільову функцію. Тому його доцільно застосовувати в масовому виробництві, де витрати на розрахунок допусків окупляться економією, отриманою при виготовленні виробів.

**Метод пропорційного впливу.** На всі складові ланки призначають допуски з урахуванням коефіцієнтів передавальних відношень  $\xi_i$ , які характеризують ступінь впливу складових ланок на замикальну, відносного розсіювання  $\alpha_i$  і номінального значення.

## 5. ЗАДАЧІ, ЩО РОЗВ'ЯЗУЮТЬ ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗМІРНИХ ЛАНЦЮГІВ

За допомогою розмірних ланцюгів розв'язують пряму і обернену задачі.

При розв'язанні прямої (конструкторської (проектної)) задачі з урахуванням установлених вимог до замикальної ланки визначають номінальні розміри, допуски, координати середин полів допусків і граничні відхилення всіх ланок, що складають розмірний ланцюг.

При розв'язанні оберненої (технологічної) задачі з урахуванням значень номінальних розмірів, допусків, координат їх центрів, граничних відхилень складових ланок знаходять ті ж характеристики останньої ланки або (за необхідності слід знайти похибку замикальної ланки) поле розсіювання, координату його середини, або граничне відхилення останньої ланки на підставі аналогічних даних для складових ланок.

За розв'язанням оберненої задачі перевіряють правильність розв'язання прямої задачі.

### **5.1. Порядок розв'язання прямої (конструкторської) задачі**

Алгоритм розв'язання прямої задачі:

1. Формулюють задачу і встановлюють замикальну ланку.
2. Визначають номінальний розмір, координату середини поля допуску  $\Delta_{0\Delta}$ , допуск  $\delta_{\Delta}$  або граничні відхилення замикальної ланки.
3. Знаходять складові ланки і будують схему розмірного ланцюга, записують його рівняння і визначають передавальні відношення.
4. Розраховують номінальні розміри всіх складових ланок.
5. Вибирають метод досягнення необхідної точності останньої ланки, економічний у цих виробничих умовах, з урахуванням середньої величини допуску.
6. Розраховують і встановлюють допуски, координати середин полів допусків і граничні відхилення:
  - а) методом повної взаємозамінності:
    - встановлюють допуск на розмір кожної зі складових ланок на основі техніко-економічних міркувань;
    - перевіряють правильність допусків;
    - визначають координати середин полів допусків складових ланок, за винятком однієї, для якої координату середини поля допуску розраховують, розв'язуючи рівняння з одним невідомим;
    - розраховують верхні та нижні граничні відхилення;
  - б) методом неповної взаємозамінності:
    - приймають допустимий відсоток ризику з економічних міркувань;
    - вибирають передбачувані закони розподілу кожної ланки з урахуванням особливостей технологічного процесу виготовлення деталей і відносних середніх квадратичних відхилень, що їм відповідають;
    - встановлюють допуск на розмір кожної складової ланки на основі техніко-економічних міркувань;
    - перевіряють правильність встановлених допусків;
    - визначають координати середин полів допусків для складових ланок, розраховують відсутню координату і граничні відхилення;
  - в) методом групової взаємозамінності:

- встановлюють на основі техніко-економічних міркувань виробничий допуск  $\delta'_\Delta > \delta_\Delta$  замикальної ланки;
- розраховують виробничі допуски  $\delta'_i$  на розмір кожної складової ланки з дотриманням умови;
- розраховують координати середин полів допусків складових ланок у кожній з груп;
- визначають допуски на повороти і відхилення форми поверхонь деталей так само, як і методом повної взаємозамінності;
- г) методом припасування:
  - вибирають компенсувальну ланку;
  - встановлюють економічні в певних виробничих умовах допуски на розміри всіх складових ланок і координати середин полів допусків;
  - визначають виробничий допуск  $\delta'_\Delta$ ;
  - розраховують найбільшу можливу компенсацію  $\delta_k$  ;
  - обчислюють величину поправки  $\Delta_k$  ;
  - вносять поправку в координату середини поля допуску компенсувальної ланки;
- д) методом регулювання:
  - вибирають компенсувальну ланку, яка конструктивно може бути оформлена у вигляді нерухомого або рухомого компенсатора;
  - розраховують найбільшу можливу компенсацію  $\delta_k$  ;
  - обчислюють кількість ступенів нерухомих компенсаторів і координати середин полів допусків;
  - розраховують розміри нерухомих компенсаторів і кількість нерухомих компенсаторів кожного ступеня;
  - встановлюють допуски на розміри всіх складових ланок, економічно прийнятих у цих виробничих умовах, і визначають виробничий допуск  $\delta'_\Delta$  замикальної ланки.

### Приклад розв'язання конструкторської (прямої) задачі

Потрібно забезпечити осьовий зазор  $A_\Delta$  плунжерного насоса авіаційного двигуна (рис. 5.1).

Згідно з призначеннями механізму мінімальний зазор має дорівнювати нулю, а максимальний – 0,2 мм.

Отже, поле допуску на зазор

$$\delta_{0A_\Delta} = 0,2 - 0 = 0,2 \text{ мм,}$$

а координата середини поля допуску

$$\Delta_{0A_\Delta} = \frac{0,2 + 0}{2} = +0,1 \text{ мм.}$$

Рівняння розмірного ланцюга, що визначає величину зазору (рис. 5.1), має такий вигляд:

$$A_{\Delta} = -A_1 + A_2 - A_3.$$

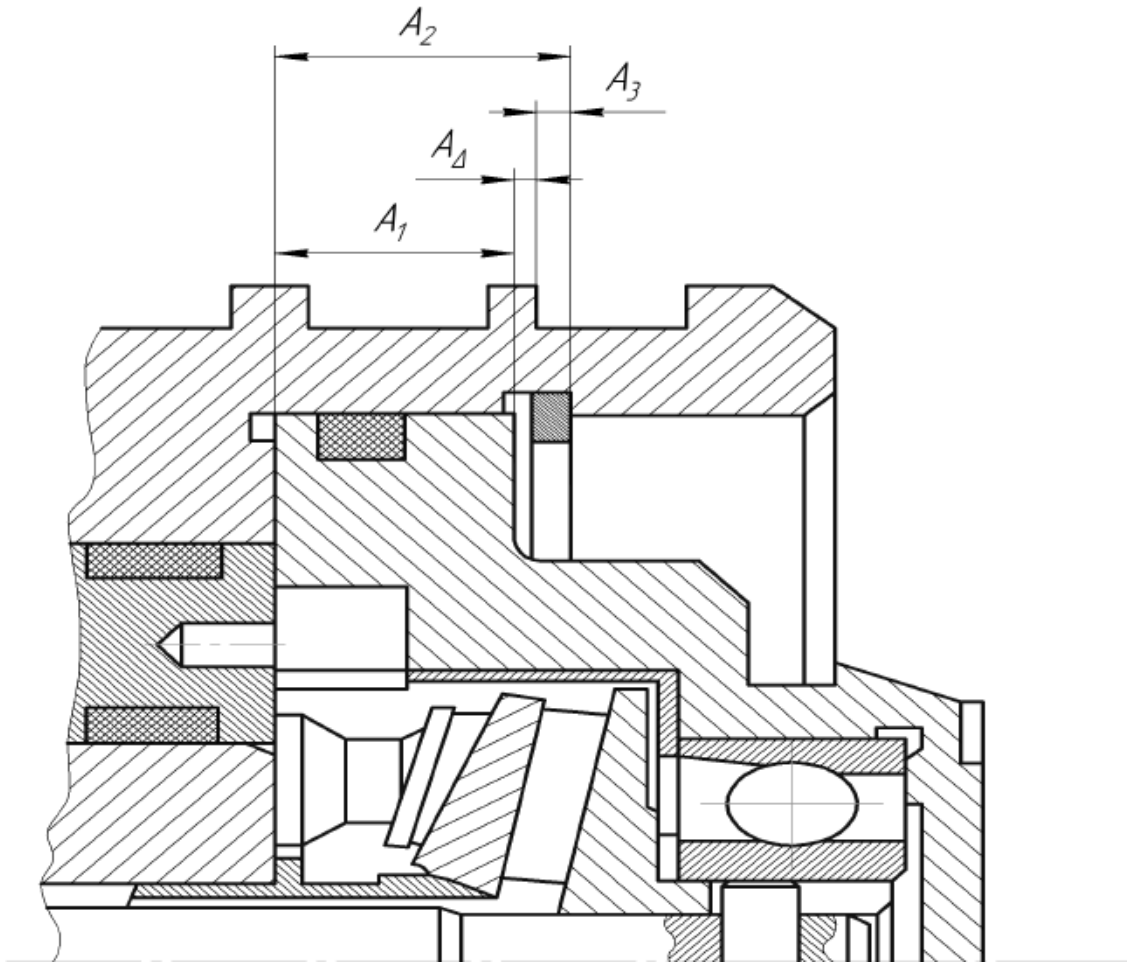


Рис. 5.1. Розмірний ланцюг для розрахунку осьового зазору плунжерного насоса

Задачу розв'язують п'ятьма методами досягнення заданої точності замикальної ланки.

### Метод повної взаємозамінності

Необхідно дотримуватися умови  $\sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i} |\delta_{A_i}| = \delta_{A_{\Delta}}$  в лінійному розмірному ланцюзі  $|\xi_{A_i}| = 1$ .

Щодо ступеня складності досягнення необхідну точність складових ланок встановлюємо шляхом підбору таких допусків:  $\delta_{A_1} = 0,03$  мм,  $\delta_{A_2} = 0,15$  мм,  $\delta_{A_3} = 0,02$  мм.

Приймаємо координати середин полів допусків:

$$\Delta_{0A_1} = -0,015 \text{ мм}, \Delta_{0A_2} = +0,075.$$

Координату середини поля допуску третьої ланки знаходимо згідно з рівнянням

$$\Delta_{0A_\Delta} = \sum_{i=1}^k \vec{\Delta}_{0A_i} = \sum_{k+1}^{m-1} \vec{\Delta}_{0A_i} = -\Delta_{0A_1} + \Delta_{0A_2} - \Delta_{0A_3};$$

$$0,1 = 0,015 + 0,075 - \Delta_{0A_3}.$$

Отже,  $\Delta_{0A_3} = -0,01$  мм.

Перевіряємо правильність призначення допусків і надаємо значення  $\Delta_{0A_\Delta}$ ,  $\delta_{A_\Delta}$  через  $\Delta_{0A_1}$  і  $\delta_{A_1}$ , встановлені при розрахунку допусків:

$$\Delta_{uA_\Delta} = \Delta_{0A_\Delta} - \frac{\delta_{A_\Delta}}{2} = 0,015 + 0,075 + 0,01 - \frac{0,03 + 0,15 + 0,02}{2} = 0;$$

$$\Delta_{eA_\Delta} = \Delta_{0A_\Delta} + \frac{\delta_{A_\Delta}}{2} = 0,015 + 0,075 + 0,01 + \frac{0,03 + 0,15 + 0,02}{2} = 0,2 \text{ мм.}$$

Зіставлення отриманих значень з умовами завдання показує, що допуски встановлено правильно.

### Метод неповної взаємозамінності

Задаємо значення коефіцієнта ризику  $t_\Delta$  і відносного середнього квадратичного відхилення  $\lambda_{A_i}$ .

Припустимо, що в цьому випадку ризик  $P = 1\%$ , при якому  $t_\Delta = 2,57$ , економічно виправданий.

Вважаючи, що умови виготовлення деталей такі, що розподіл відхилень розмірів буде близьким до закону Гаусса, приймаємо

$$\lambda_{A_i}^2 = \frac{1}{9}.$$

Через труднощі досягнення необхідну точність кожної складової ланки встановлюємо шляхом підбору таких величин полів допусків:

$$\delta_{A_1} = 0,1 \text{ мм}, \delta_{A_2} = 0,2 \text{ мм}, \delta_{A_3} = 0,06 \text{ мм.}$$

Правильність підбору допусків можна перевірити за формулою (2.4):

$$\delta_{A_{\Delta}} = t_{A_{\Delta}} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i}^2 \lambda_{A_i}^2 \delta_{A_i}^2} = 2,57 \sqrt{\frac{1}{9} (0,1^2 + 0,2^2 + 0,06^2)} = 0,2 \text{ мм.}$$

Встановлюємо координати середин полів допусків:

$$\Delta_{0A_1} = 0; \Delta_{0A_2} = 0,1 \text{ мм.}$$

Значення  $\Delta_{0A_3}$  знаходимо з рівняння

$$\begin{aligned} \Delta_{0A_{\Delta}} &= -\Delta_{0A_1} + \Delta_{0A_2} - \Delta_{0A_3}; \\ 0,1 &= 0 + 0,1 - \Delta_{0A_3}; \Delta_{0A_3} = 0. \end{aligned}$$

Правильність встановлених допусків можна перевірити таким чином:

$$\begin{aligned} \Delta_{uA_{\Delta}} &= \left( \sum_{i=1}^k \vec{\Delta}_{0A_i} - \sum_{k+1}^{m-1} \vec{\Delta}_{0A_i} \right) - t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i}^2 \lambda_{A_i}^2 \left( \frac{\delta_{A_i}^2}{2} \right)} = 0,1 - 0,1 = 0; \\ \Delta_{uA_{\Delta}} &= \left( \sum_{i=1}^k \vec{\Delta}_{0A_i} - \sum_{k+1}^{m-1} \vec{\Delta}_{0A_i} \right) + t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i}^2 \lambda_{A_i}^2 \left( \frac{\delta_{A_i}^2}{2} \right)} = 0,1 + 0,1 = 0,2 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Граничні відхилення розмірів складових ланок

$$A_1^{\pm 0,05}, A_2^{\pm 0,2}, A_3^{\pm 0,03}.$$

### Метод групової взаємозамінності

При розв'язанні задачі методом групової взаємозамінності перш за все необхідно встановити кількість груп, на які повинні бути розсортовані деталі після виготовлення, і значення виробничого допуску замикальної ланки.

Припустимо, що розширення  $\delta_{A_\Delta}$  в три рази в цьому випадку економічно обґрунтовано, у зв'язку з чим кількість груп дорівнює трьом.

Таким чином,  $\delta'_{A_\Delta} = \delta_{A_\Delta} \cdot 3 = 0,2 \cdot 3 = 0,6$  мм.

Під час розрахунку допусків має бути дотримано умову

$$\sum_{i=1}^k |\xi_i| \vec{\delta}_i = \sum_{k+1}^{m-1} |\xi_i| \vec{\delta}_i,$$

де  $\vec{\delta}_i$  і  $\vec{\delta}$  – допуски збільшуючих і зменшуючих ланок.

Згідно з цим

$$\delta_{A_2} = \delta_{A_1} + \delta_{A_3} = \frac{1}{2} \delta'_{A_\Delta},$$

звідки

$$\delta_{A_2} = \delta_{A_1} + \delta_{A_3} = \frac{1}{2} \delta'_{A_\Delta} = 0,3 \text{ мм.}$$

Погодившись із ступенем складності виготовлення деталей, встановлюємо

$$\delta_{A_1} = 0,24 \text{ мм і } \delta_{A_3} = 0,06 \text{ мм.}$$

Визначаємо поля допусків і координати їх центрів для деталей кожної групи (табл. 5.1).

При призначенні координат середин полів допусків рівняння має вигляд

$$\Delta_{0A_\Delta} = -\Delta_{0A_1} + \Delta_{0A_2} - \Delta_{0A_3}.$$

В останніх стовпцях табл. 5.1 показано, що при з'єднанні деталей в кожній з груп необхідні межі зазору будуть забезпечені.

Таблиця 5.1

Група	$\delta_{A_1}$	$\Delta_{0A_1}$	$\delta_{A_2}$	$\Delta_{0A_2}$	$\delta_{A_3}$	$\Delta_{0A_3}$	$\delta_{A_\Delta}$	$\Delta_{0A_\Delta}$
I	0,08	-0,04	0,1	+0,05	0,02	-0,01	0,2	+0,1
II	0,08	+0,04	0,1	+0,15	0,02	+0,01	0,2	+0,1
III	0,08	+0,12	0,1	+0,25	0,02	+0,03	0,2	+0,1

Граничні відхилення розмірів складових ланок наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Група	$A_1$	$A_2$	$A_3$
I	-0,08	+0,1	-0,02
II	+0,08	+0,2 +0,1	+0,02
III	+0,16 +0,08	+ 0,3 +0,2	+0,04 +0,02

### Метод припасування

Для досягнення необхідної точності зазору методом припасування виберемо як компенсувальну ланку розміром  $A_3$  кільце, яке легко змінити.

Встановимо на складові ланки економічно доцільні значення полів допусків і координати їх центрів (табл. 5.3).

Таблиця 5.3

Ланка	$\delta'_{A_i}$	$\Delta'_{0A_i}$
$A_1$	0,3	-0,15
$A_2$	0,4	+ 0,2
$A_3$	0,1	+ 0,25

Тоді виробничий допуск замикальної ланки розшириться до значення

$$\delta'_{A_\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_{A_i}| \delta_{A_i} = 0,3 + 0,4 + 0,1 = 0,8 \text{ мм.}$$

Найбільша величина компенсації може бути такою:

$$\delta_k = \delta'_{A_\Delta} - \delta_{A_\Delta} = 0,8 - 0,2 = 0,6 \text{ мм.}$$

Для того, щоб створити на ланці  $A_3$  необхідний для припасування шар матеріалу, до координати середини поля допуску цієї ланки слід ввести поправку



$$\Delta_k = \frac{\delta_k}{2} + \Delta'_{0.A_\Delta} - \Delta_{0.A_\Delta} = \frac{0,6}{2} + (0,15 + 0,2 - 0,25) - 0,1 = 0,3 \text{ мм.}$$

Тому встановлюють

$$\Delta_{0.A_3} = 0,25 + 0,3 = 0,55 \text{ мм.}$$

Граничні відхилення розмірів складових ланок

$$A_{1-0,3}, A_2^{+0,4}, A_3^{+0,6}_{+0,5}.$$

### Метод регулювання із застосуванням нерухомого компенсатора

Виберемо як компенсатор ланку, як і при розв'язанні задачі методом припасування, і встановимо такі допуски  $\delta'_{A_i}$ :

- 0,2 – для ланки  $A_1$ ;
- 0,4 – для ланки  $A_2$ ;
- 0,05 – для ланки  $A_3$ .

У розмірного ланцюга А (див. рис. 5.1) компенсації підлягають відхилення тільки ланок  $A_1$  і  $A_2$ , які в сумі становлять

$$\delta'_{A_\Delta} = \sum_{i=1}^{m-2} |\xi_{A_i}| \delta'_{A_i} = \delta'_{A_1} + \delta'_{A_2} = 0,2 + 0,4 = 0,6 \text{ мм.}$$

Відповідно до цього найбільша величина компенсації

$$\delta_k = \delta'_{A_1} - \delta_{A_2} = 0,60 - 0,2 = 0,4 \text{ мм.}$$

Кількість ступенів компенсаторів N обчислюють за формулою

$$N = \frac{\delta'_{A_\Delta}}{\delta_{A_\Delta} - \delta_{\text{комп}}},$$

де

$$N = \frac{0,6}{0,2 - 0,05} = 4.$$

Для спрощення розрахунку розмірів компенсаторів рекомендується призначати координати середин полів допусків складових ланок так, щоб поєднати одну з меж розширеного поля допуску останньої ланки з відповідною межею його поля допуску, заданого службовим призначенням виробу.

У зв'язку з цим при суміщенні нижніх меж полів допусків замикальної ланки (рис. 5.2) необхідно дотримуватися таких умов:

$$\begin{aligned}\Delta_{uA_{\Delta}} &= \Delta'_{uA_{\Delta}}; \\ \Delta'_{0A_{\Delta}} &= \Delta'_{uA_{\Delta}} + \frac{\delta'_{A_{\Delta}}}{2}; \\ \Delta'_{0A_{\Delta}} &= 0 + \frac{0,6}{2} = 0,3 \text{ мм.}\end{aligned}$$

Оскільки компенсації підлягають відхилення ланок  $A_1$  і  $A_2$ , то під час розрахунку координат середин полів допуск компенсатора не ураховується.

Координата середини його поля допуску має бути встановлена незалежно від координат середин полів допусків складових ланок  $A_1$  і  $A_2$ . Для спрощення розрахунку розмірів компенсаторів рекомендується ставити координату середини поля допуску компенсувальної ланки, яка дорівнює половині його поля допуску зі знаком мінус.

У цій задачі

$$\Delta'_{0A_3} = -\frac{\delta'_{A_3}}{2} = -\frac{0,05}{2} = -0,025 \text{ мм.}$$

Таким чином,

$$\Delta'_{0A_{\Delta}} = -\Delta'_{0A_1} + \Delta'_{0A_2} = 0,3 \text{ мм.}$$

Встановимо

$$\Delta'_{0A_1} = -0,1 \text{ мм і } \Delta'_{0A_2} = 0,2 \text{ мм.}$$

При встановлених координатах середин полів допусків ланок  $A_1$  і  $A_2$  поле допуску  $\delta'_{A_{\Delta}}$  займе щодо заданого поля допуску  $\delta_{A_{\Delta}}$  положення, вказане на рис. 5.2.

При величині ступеня компенсації, що дорівнює

$$\delta_{A_{\Delta}} - \delta_{\text{комп}} = 0,2 - 0,05 = 0,15 \text{ мм,}$$

і кількості груп компенсаторів  $N = 4$  поле виробничого допуску  $\delta'_{A_{\Delta}}$  поділяють на чотири зони з межами (див. рис. 5.2). Відхилення, що виникають у межах тієї чи іншої зони, мають компенсуватися шляхом постановки у виріб відповідного кільця (компенсатора).

Розмір компенсатора першого ступеня дорівнює його номінальним розмірам. Розміри компенсаторів кожного наступного ступеня відрізняються від розмірів компенсаторів попереднього ступеня на величину ступеня компенсації.

Розміри компенсаторів з урахуванням допуску на виготовлення:

I ступінь –  $A_3 - 0,05$  мм;

II ступінь –  $(A_3 + 0,15) - 0,05$  мм;

III ступінь –  $(A_3 + 0,30) - 0,05$  мм;

IV ступінь –  $(A_3 + 0,45) - 0,05$  мм.

При заданні розмірів компенсаторів різницю в номіналах доцільно перенести на координати середин полів їх допусків. Тоді розміри компенсаторів мають бути такими:

– для I ступеня  $-0,05$  мм;

– для II ступеня  $- \begin{matrix} +0,15 \\ +0,10 \end{matrix}$  мм;

– для III ступеня  $- \begin{matrix} +0,30 \\ +0,25 \end{matrix}$  мм;

– для IV ступеня  $- \begin{matrix} +0,45 \\ +0,40 \end{matrix}$  мм.

На рис. 5.2 показано, як виконується компенсація відхилень, що знаходяться в різних зонах  $\delta'_{A_k}$ .

Якщо компенсатор є збільшуючою ланкою, то поправку  $\Delta'_k$  вносять зі своїм знаком, якщо зменшуючою – з протилежним.

Якщо координати середин полів допусків складових ланок  $A_1$  і  $A_2$  встановлено довільно, то при визначенні розміру компенсаторів першого ступеня необхідно внести поправку в координату середини поля допуску компенсувальної ланки:

$$\Delta'_k = \frac{\delta_k}{2} - \Delta'_{0A_k},$$

де  $\Delta'_{0A_k} = \sum_{i=1}^k \vec{\Delta}'_{0A_i} - \sum_{k+1}^{m-2} \vec{\Delta}'_{0A_i}$ , причому значення  $\Delta'_{0A_1}$  встановлено довільно.

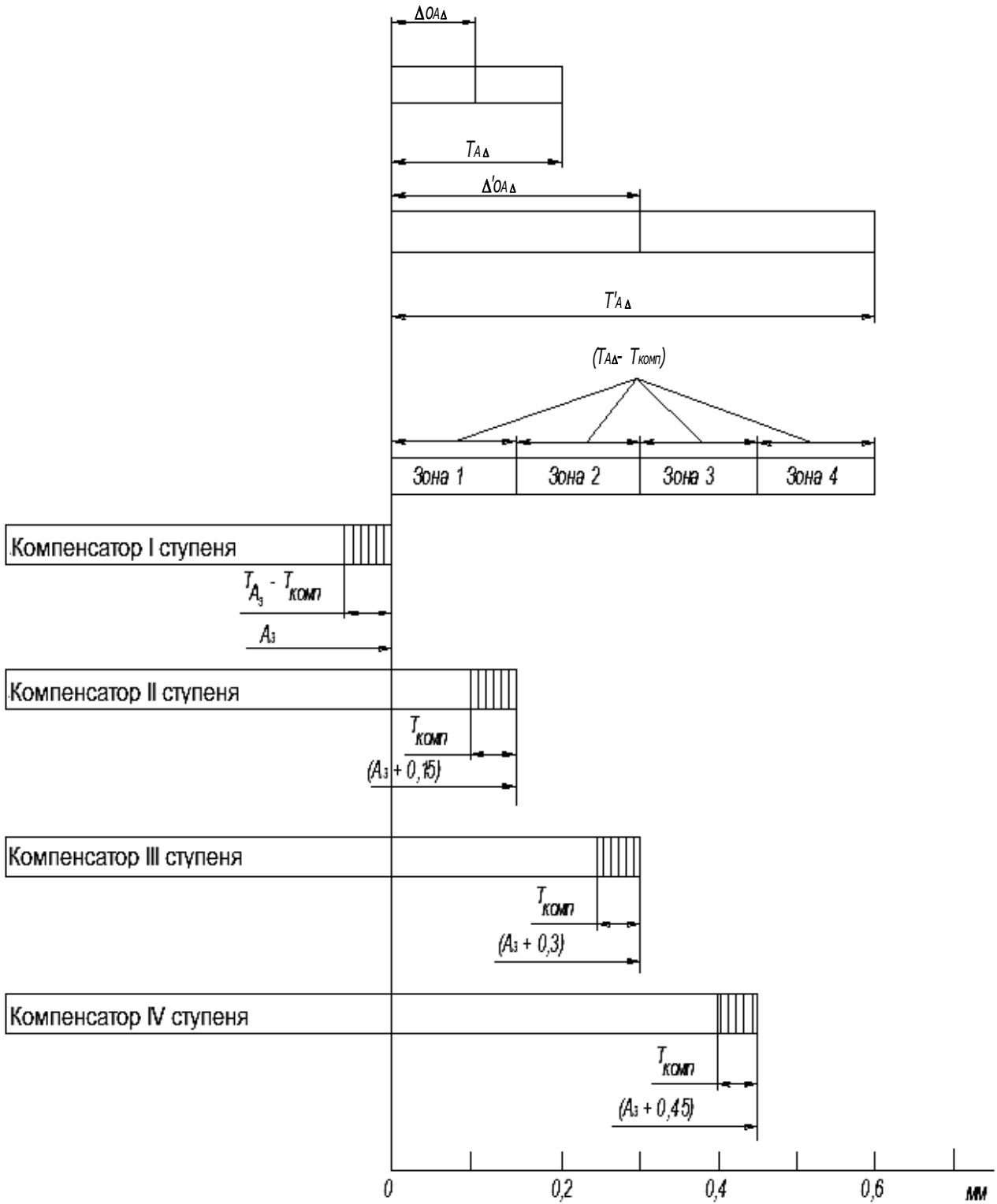


Рис. 5.2. Розподіл полів допусків компенсаторів

## 5.2. Порядок розв'язання оберненої (технологічної) задачі

При розв'язанні оберненої задачі порядок розрахунку розмірних ланцюгів дещо інший. Слід розрізняти теоретичні й виробничі розрахунки. Теоретичні розрахунки використовують технологи при впровадженні у виробництво нових виробів з метою встановлення методів складання. Виробничі розрахунки виконують в умовах, коли виріб знаходиться у виробництві. Мета цих розрахунків – перевірка правильності призначення допусків на складові ланки, а при розрахунку імовірнісним методом – уточнення прийнятих значень коефіцієнтів відносного розсіювання і відносної асиметрії. Розглянемо порядок розрахунку розмірних ланцюгів при розв'язанні оберненої задачі для теоретичних розрахунків.

Порядок теоретичного розрахунку розмірних ланцюгів:

1. Вибирають метод розрахунку розмірних ланцюгів – максимуму-мінімуму або імовірнісний. При виборі імовірнісного методу встановлюють коефіцієнт ризику  $t$  і коефіцієнт  $\lambda_i'$  для всіх складових ланок, а також приймають значення коефіцієнтів  $\alpha_i$ .

2. Обчислюють номінальний розмір, допуск і координату середини поля допуску останньої ланки залежно від прийнятого методу розрахунку розмірних ланцюгів. Для перевірки правильності розв'язання задачі порівнюють отримані значення  $\delta_{\Delta}$  і  $\Delta_{0_{\Delta}}$  із заданими за кресленням і з'ясовують причини розбіжностей, якщо такі є.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

Богуслаев, В. А. Технология изготовления авиационных двигателей / В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, А. И. Долматов. – Запорожье : Мотор Січ, 2013. – 340 с.

Никитин, А. Н. Технология сборки двигателей летательных аппаратов / А. Н. Никитин. – М. : Машиностроение, 1982. – 269 с.

Размерный анализ конструкций: справочник / под ред. С. Г. Бондаренко. – Киев : Техника, 1989. – 150 с.

Размерные цепи РД 50-635-87 : метод. указания / Государственный комитет СССР по стандартам. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 46 с.

Трофимов, К. Б. Допуски, посадки и контроль калибрами гладких деталей. Выбор посадок: учеб. пособие / К. Б. Трофимов. – Харьков: ХАИ, 1980. – 75 с.

## ЗМІСТ

1. Загальні положення .....	3
2. Розрахунки складальних розмірних ланцюгів .....	4
2.1. Основні розрахункові формули .....	4
2.2. Лінійні розмірні ланцюги .....	7
2.3. Площинні розмірні ланцюги .....	10
2.4. Векторні розмірні ланцюги .....	12
3. Методи досягнення заданої точності .....	14
3.1. Метод повної взаємозамінності .....	14
3.2. Метод неповної взаємозамінності .....	15
3.3. Метод підбору.....	16
3.4. Метод компенсації (регулювання) .....	18
3.5. Метод припасування .....	19
3.6. Метод з віртуальним комп'ютерним складанням .....	20
3.7. Вибір методу досягнення заданої точності .....	20
4. Методи розрахунку допусків .....	22
5. Задачі, що розв'язують за допомогою розмірних ланцюгів .....	25
5.1. Порядок розв'язання прямої (конструкторської) задачі .....	26
5.2. Порядок розв'язання оберненої (технологічної) задачі .....	37
Бібліографічний список .....	38

Навчальне видання

**Некрасов Олександр Дмитрович**

**РОЗМІРНІЙ АНАЛІЗ СКЛАДАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ  
В АВІАДВИГУНОБУДУВАННІ**

Редактор В. І. Філатова

Зв. план, 2021

Підписано до друку 02.04.2021

Формат 60x84 1/16. Папір офс. Офс. друк

Ум. друк. арк. 2,2. Обл.-вид. арк. 2,5. Наклад 100 пр.

Замовлення 56. Ціна вільна

---

Видавець і виготовлювач

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Видавничий центр «ХАІ»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

[izdat@khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001