

УДК 621.01

doi: 10.53816/23061456_2025_7–8_101

**ВЕРОЯТНОСТЬ УСПЕШНОГО КОМПЛЕКТОВАНИЯ ИЗДЕЛИЯ В
МЕЛКОСЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ, СБОРОЧНАЯ РАЗМЕРНАЯ ЦЕПЬ
КОТОРОГО РАССЧИТАНА ПО ТЕОРЕТИКО-ВЕРОЯТНОСТНОМУ МЕТОДУ**

**THE PROBABILITY OF SUCCESSFUL COMPLETION OF A PRODUCT IN
SMALL-SCALE PRODUCTION, THE ASSEMBLY SIZE CHAIN OF WHICH IS
CALCULATED USING THE PROBABILITY-THEORETICAL METHOD**

Канд. техн. наук А.Ю. Андриюшкин, Чжао Чэн, Чжэньнин Ли

Ph.D. A.Yu. Andryushkin, Zhao Cheng, Zhenning Li

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Размерный анализ и уровень взаимозаменяемости собираемых изделий обуславливает долговечность и безотказность техники специального назначения. Количество изделий в выпускаемой партии и число звеньев в размерной цепи влияют на собираемость отдельного изделия. Теоретико-вероятностный метод рекомендуется для расчета многозвенных сборочных размерных цепей. Предложена методика оценки вероятности успешного комплектования отдельного изделия техники специального назначения. Методика учитывает число изделий в выпускаемой партии, доверительные интервалы истинного среднего арифметического значения размера и истинного среднего квадратического отклонения размера составляющего звена сборочной цепи. Рассчитана многозвенная сборочная цепь, установлено увеличение вероятности успешного комплектования отдельного изделия с увеличением числа изделий в выпускаемой партии.

Ключевые слова: сборочная цепь, доверительный интервал, вероятность успешного комплектования изделия, собираемость, теоретико-вероятностный метод, допуск размера.

Dimensional analysis and the level of interchangeability of assembled products determines the durability and reliability of special-purpose equipment. The number of products in the manufactured batch and the number of links in the dimensional chain affect their assemblability of an individual product. The probability-theoretic method is recommended for calculating multi-link assembly dimensional chains. A method for estimating the probability of successful completion of a separate piece of special-purpose equipment is proposed. The methodology takes into account the number of products in the manufactured batch, the confidence intervals of the true arithmetic mean of the size and the true mean square deviation of the size of the component link of the assembly chain. A multi-link assembly chain is calculated, an increase in the probability of successful completion of a separate product with an increase in their number in the manufactured batch is established.

Keywords: assembly chain, confidence interval, probability of successful completion of the product, assemblability, probability-theoretic method, size tolerance.

Обеспечение безотказности и долговечности изделий техники специального назначения (ТСН) является актуальной проблемой. Показатели качества изделий формируются при проектировании и проявляют себя на протяжении всего жизненного цикла изделия, в частности при изготовлении, сборке и эксплуатации. Так, 90 % отказов изделий происходит из-за низкой точности сборки.

Собираемость — это совокупность свойств изделия, технологического процесса изготовления и организации сборочного производства, обеспечивающих достижение заданных технических требований к собранному изделию и его функционирование. Собираемость обеспечивается способностью сопрягаемых деталей входить в сборочную единицу, а сборочных единиц — в изделие без каких-либо пригоночных работ, не предусмотренных технологическим процессом. Для обеспечения собираемости изделия на этапе технологической подготовки производства проводят размерный анализ, направленный на достижение необходимой точности изготовления деталей, а также их сопряжение, регулирование и наладку при сборке. При размерном анализе определяют один из методов сборки по уровню взаимозаменяемости [1–13]:

- 1) метод полной взаимозаменяемости (метод «максимума-минимума»);
- 2) метод неполной взаимозаменяемости (теоретико-вероятностный метод);
- 3) метод групповой взаимозаменяемости (селективная сборка);
- 4) метод пригонки;
- 5) метод регулирования.

Расчет размерной цепи изделия методом «максимума-минимума», обеспечивает полную взаимозаменяемость деталей, они соединяются без пригонки, регулирования и подбора. При любом сочетании размеров деталей, изготовленных в пределах расчетных допусков, значения замыкающего звена размерной цепи не выходят за допускаемые пределы.

При расчете многозвенных сборочных размерных цепей методом «максимума-минимума» значения допусков составляющих звеньев малы, так как в расчет заложено сочетание экстремальных значений размеров (одновременное сочетание размеров наибольших увеличивающих и наименьших уменьшающих звеньев или обратное их

сочетание), что маловероятно. При малых допусках трудоемкость изготовления деталей возрастет, при обработке по 7 качеству точности она в 2,5 раза больше чем по 9 качеству.

Расширить допуска размеров многозвенных сборочных цепей позволяет теоретико-вероятностный метод, который, по сравнению с методом «максимума-минимума», учитывает распределения размеров деталей и суммирование погрешностей составляющих звеньев. Составляющие звенья размерной цепи представляются как независимые случайные величины, а замыкающее звено — как сумма независимых переменных, и рассматриваются законы их распределения, а также случайный характер сочетания размеров при сборке. Собираемость изделия обеспечивается за счет размеров, группирующихся около координаты середины поля допуска соответствующих звеньев, при этом отсутствует риск несоблюдения предельных значений замыкающего звена.

Собираемость отдельного изделия зависит от числа изделий в изготавливаемой партии. Чем больше число выпускаемых изделий, тем выше вероятность успешного комплектования отдельного изделия, сборочная размерная цепь которого рассчитана по теоретико-вероятностному методу.

Итак, актуально оценить влияние числа выпускаемых изделий ТСН в мелкосерийном производстве (5–50 изделий) на вероятность успешного комплектования отдельного изделия, сборочная цепь которого рассчитана по теоретико-вероятностному методу.

Цель исследования — оценка вероятности успешного комплектования отдельного изделия ТСН в мелкосерийном производстве, сборочная размерная цепь которого рассчитана по теоретико-вероятностному методу.

Задачи исследования:

1. Применение доверительных интервалов для оценки измерений среднего арифметического значения размера и среднего квадратического отклонения размера составляющего звена сборочной цепи.

2. Разработка методики оценки вероятности успешного комплектования отдельного изделия ТСН в мелкосерийном производстве.

3. Расчет по предложенной методике вероятности успешного комплектования отдельного изделия ТСН в мелкосерийном производстве.

Расчет сборочной размерной цепи изделия теоретико-вероятностным методом

Номинальный размер замыкающего звена сборочной размерной цепи [11]:

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot A_i, \quad (1)$$

где i — номер составляющего звена;

n — число составляющих звеньев;

A_i — номинальный размер составляющего звена, мм;

ξ_i — коэффициент, характеризующий влияние погрешности составляющего звена на замыкающее звено ($\xi_i = +1$ для увеличивающих звеньев и $\xi_i = -1$ для уменьшающих звеньев);

A_{Δ} — номинальный размер замыкающего звена, мм.

Правильность решения сборочной размерной цепи теоретико-вероятностным методом зависит от близости полученных статистических оценок размеров звеньев к их истинным значениям. В теории размерных цепей наиболее часто применяют следующие законы распределения случайной величины (размеров деталей): закон равной вероятности, треугольный закон (закон Симпсона), нормальный закон (закон Гаусса). Если размер звена сборочной цепи распределен нормально, тогда допуск размера составляющего звена выражается в долях истинного среднего квадратического отклонения $\pm 3\sigma_{A_i}$, в него входит 99,73 % всех значений размера [11]:

$$T_{A_i} = 6 \cdot \sigma_{A_i}, \quad (2)$$

где T_{A_i} — допуск размера составляющего звена A_i , мм;

σ_{A_i} — истинное среднее квадратическое отклонение размера составляющего звена A_i , мм.

Допуск размера замыкающего звена сборочной цепи [11]:

$$T_{A_{\Delta}} = t \cdot \left(\sum_{i=1}^n \lambda_{A_i}^2 \cdot T_{A_i}^2 \right)^{0,5}, \quad (3)$$

где $T_{A_{\Delta}}$ — допуск размера замыкающего звена A_{Δ} , мм;

t — коэффициент, зависящий от процента риска;

$\lambda_{A_i}^2$ — коэффициент относительного рассеяния размера составляющего звена A_i (для нормального распределения $\lambda_{A_i} = 0,333$).

Процент риска — это вероятность, с которой при всех годных размерах составляющих звеньев размер замыкающего звена сборочной цепи выйдет за допускаемые пределы. В этом случае на сборку попали годные детали с неблагоприятным сочетанием действительных размеров (близких к предельным). Чтобы размер замыкающего звена изделия входил в допуск, достаточно заменить некоторые из деталей на другие, то есть нарушить неблагоприятное сочетание размеров.

Координата середины поля допуска замыкающего звена [11]:

$$C_{A_{\Delta}} = \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot C_{A_i}, \quad (4)$$

где $C_{A_{\Delta}}$ — координата середины поля допуска замыкающего звена A_{Δ} , мм;

C_{A_i} — координата середины поля допуска составляющего звена A_i , мм.

Доверительные интервалы для оценки среднего арифметического значения размера и среднего квадратического отклонения размера составляющего звена

В изготавливаемой партии m изделий, для комплектации одного изделия требуется n годных деталей (n — число составляющих звеньев A_i сборочной цепи A).

С помощью доверительного интервала оценим истинное среднее арифметическое значение размера и его истинное среднее квадратическое отклонение, полученное при измерении m размеров составляющего звена A_i поступивших на сборку деталей.

Доверительный интервал для истинного среднего арифметического значения размера составляющего звена. Выборочное среднее арифметическое значение размера составляющего звена A_i сборочной цепи [11]:

$$A_{i\text{cp}} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m A_{ij}, \quad (5)$$

где j — номер детали;

m — число деталей, у которых измерен размер составляющего звена A_i ;

A_{ij} — измеренный размер составляющего звена A_i , мм;

$A_{\text{иср}}$ — выборочное среднее арифметическое значение размера составляющего звена A_i , мм.

Истинное среднее квадратическое отклонения σ_{A_i} может быть найдено только при бесконечно большом числе измеренных деталей $m \rightarrow \infty$. При ограниченном числе деталей m определяем выборочное среднее квадратическое отклонение размера s_{A_i} , являющееся точечной оценкой [11–13]:

$$s_{A_i} = \left(\frac{1}{m-1} \cdot \sum_{j=1}^m (A_{ij} - A_{\text{иср}})^2 \right)^{0,5}, \quad (6)$$

где s_{A_i} — выборочное среднее квадратическое отклонение размера составляющего звена A_i , мм.

Доверительный интервал для истинного среднего арифметического значения размера $A_{\text{иср-ист}}$ имеет вид [14]:

$$A_{\text{иср}} - \delta_{A_i} < A_{\text{иср-ист}} < A_{\text{иср}} + \delta_{A_i}, \quad (7)$$

где δ_{A_i} — точность интервальной оценки истинного среднего арифметического значения размера составляющего звена A_i , мм;

$A_{\text{иср-ист}}$ — истинное среднее арифметическое значение размера составляющего звена A_i , мм.

Если число деталей $m > 30$, то точность интервальной оценки истинного среднего арифметического значения размера составляющего звена A_i [14]:

$$\delta_{A_i} = \frac{s_{A_i} \cdot z_{\alpha}}{m^{0,5}}, \quad (8)$$

где z_{α} — квантиль нормального распределения уровня $(1 - 0,5 \cdot \alpha)$;

α — уровень значимости — вероятность, с которой значение параметра не попадает в доверительный интервал;

$\beta = (1 - \alpha)$ — уровень доверия (доверительная вероятность) — вероятность того, что доверительный интервал содержит значение параметра.

Если число деталей $m \leq 30$, тогда вместо нормального распределения применяют t -распределение (распределение Стьюдента), и точность интервальной оценки истинного среднего

арифметического значения размера составляющего звена A_i [14]:

$$\delta_{A_i} = \frac{s_{A_i} \cdot t_{\alpha}}{m^{0,5}}, \quad (9)$$

где t_{α} — квантиль распределения Стьюдента уровня $(1 - 0,5 \cdot \alpha)$, при числе степеней свободы $k = m - 1$.

Доверительный интервал для истинного среднего квадратического отклонения размера составляющего звена. Выборочное среднее квадратическое отклонение размера составляющего звена A_i стремится к истинному значению $s_{A_i} \rightarrow \sigma_{A_i}$ при $m \rightarrow \infty$, и наоборот, при малых m отличие s_{A_i} от σ_{A_i} может быть значительным. Для получения s_{A_i} порядка σ_{A_i} необходимо, чтобы среди погрешностей был полный набор по кривой Гаусса, то есть погрешностей, соответствующих $(\sigma_{A_i}, 2\sigma_{A_i}, 3\sigma_{A_i})$. В действительности могут оказаться случаи набора только малых погрешностей (s_{A_i} будет занижена в сравнении с σ_{A_i}) или только больших погрешностей (s_{A_i} будет завышена в сравнении с σ_{A_i}). В связи с этим дается доверительный интервал [14]:

$$\Delta_{\text{н}A_i} < \Delta_{A_i} < \Delta_{\text{в}A_i}, \quad (10)$$

где $\Delta_{\text{в}A_i}$, $\Delta_{\text{н}A_i}$ — верхняя и нижняя границы доверительного интервала истинного среднего квадратического отклонения размера σ_{A_i} , мм.

Верхняя и нижняя границы доверительного интервала истинного среднего квадратического отклонения размера σ_{A_i} [14]:

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{в}A_i} &= \frac{(m-1)^{0,5}}{(\chi_{\alpha_{\text{в}},k}^2)^{0,5}} \cdot s_{A_i}, \\ \Delta_{\text{н}A_i} &= \frac{(m-1)^{0,5}}{(\chi_{\alpha_{\text{н}},k}^2)^{0,5}} \cdot s_{A_i}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\chi_{\alpha_{\text{в}},k}^2$; $\chi_{\alpha_{\text{н}},k}^2$ — верхнее и нижнее критическое значение распределения χ^2 «хи-квадрат», вычисленные для $\alpha_{\text{н}}$ и $\alpha_{\text{в}}$, при числе степеней свободы $k = m - 1$.

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{н}} &= 0,5 \cdot (1 - \beta); \\ \alpha_{\text{в}} &= 0,5 \cdot (1 + \beta), \end{aligned} \quad (12)$$

где β — уровень доверия (доверительная вероятность).

Например, при доверительной вероятности $\beta = 95\%$ и увеличении в выпускаемой партии числа сборочных единиц m , доверительный интервал истинного среднего квадратического отклонения σ_{A_i} сужается (табл. 1). Чем больше партия изготавливаемых сборочных единиц, тем больше m , и меньше диапазон доверительного интервала.

Увеличение числа сборочных единиц m в выпускаемой партии благоприятно влияет на их собираемость, так как повышается вероятность благоприятного сочетания размеров составляющих звеньев отдельной сборочной единицы.

Вероятность успешного комплектования отдельного собираемого изделия

Вероятность успешного комплектования отдельного собираемого изделия обусловлена благоприятным сочетанием размеров составляющих звеньев сборочной цепи. Эта вероятность высока, если действительный размер каждого составляющего звена близок к координате середины поля допуска, при этом поле допуска существенно больше доверительного интервала истинного среднего арифметического значения размера и истинного среднего квадратического отклонения размера. Вероятность успешного комплектования отдельного собираемого изделия можно рассчитать по формуле полной вероятности (формуле Байеса):

$$P_{\text{ук}}(A) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot P(A / A_{i\text{д}}), \quad (13)$$

где $P_{\text{ук}}(A)$ — вероятность успешного комплектования отдельного собираемого изделия;

$P(A / A_{i\text{д}})$ — условная вероятность нахождения действительного размера $A_{i\text{д}}$ составляющего звена A_i около координаты середины поля допуска C_{A_i} ;

$A_{i\text{д}}$ — действительный размер составляющего звена A_i , мм;

$P(A_i)$ — вероятность выбора составляющего звена A_i сборочной цепи.

Примем, что выбор любого составляющего звена сборочной цепи равновозможен, следовательно:

$$P(A_i) = \frac{1}{n}. \quad (14)$$

Условная вероятность нахождения действительного размера $A_{i\text{д}}$ составляющего звена A_i около координаты середины поля допуска C_{A_i} :

$$P(A / A_{i\text{д}}) = (1 - P_{A_{i\text{см}}}) \cdot P_{A_{i\text{ср-ист}}} \cdot P_{\sigma_{A_i}}, \quad (15)$$

где $P_{A_{i\text{см}}}$ — вероятность смещения истинного среднего арифметического значения размера $A_{i\text{ср-ист}}$ относительно координаты середины поля допуска C_{A_i} составляющего звена A_i на поле допуска T_{A_i} ;

$P_{A_{i\text{ср-ист}}}$ — вероятность нахождения истинного среднего арифметического значения размера составляющего звена $A_{i\text{ср-ист}}$ на поле допуска T_{A_i} ;

$P_{\sigma_{A_i}}$ — вероятность нахождения истинного среднего квадратического отклонения размера σ_{A_i} составляющего звена A_i на поле допуска T_{A_i} .

Вероятность смещения истинного среднего арифметического значения размера $A_{i\text{ср-ист}}$ относительно координаты середины поля допуска C_{A_i} составляющего звена A_i на поле допуска T_{A_i} :

$$P_{A_{i\text{см}}} = \frac{|A_{i\text{ср}} - (A_i + \xi_i \cdot C_{A_i})|}{T_{A_i}}. \quad (16)$$

Вероятность нахождения истинного среднего арифметического значения размера составляющего звена $A_{i\text{ср-ист}}$ на поле допуска T_{A_i} :

$$P_{A_{i\text{ср-ист}}} = 1 - \frac{2 \cdot \delta_{A_i}}{T_{A_i}}. \quad (17)$$

Таблица 1

Верхняя и нижняя границы доверительного интервала истинного среднего квадратического отклонения размера σ_{A_i} при доверительной вероятности $\beta = 0,95$ в зависимости от числа изделий m в изготавливаемой партии

Число изделий в партии m , шт.	5	10	25	∞
Нижняя граница доверительного интервала $\Delta_{\text{н}A_i}$	0,624	0,699	0,785	1
Верхняя граница доверительного интервала $\Delta_{\text{в}A_i}$	2,453	1,755	1,381	1

Вероятность нахождения истинного среднего квадратического отклонения размера σ_{A_i} составляющего звена A_i на поле допуска T_{A_i} :

$$P_{\sigma_{A_i}} = 1 - \frac{\Delta_{вA_i} - \Delta_{нA_i}}{T_{A_i}}. \quad (18)$$

Расчет вероятности успешного комплектования отдельного собираемого изделия

Теоретико-вероятностным методом рассчитаем сборочную цепь A (рис. 1) (табл. 2) и оценим вероятность успешного комплектования отдельного изделия при различном числе изделий в партии.

Номинальный размер замыкающего звена A_{Δ} сборочной цепи определим по выражению (1):

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot A_i =$$

$$= 8 + 7 + 8 + 32 + 11 + 17 + 8 - 2,5 - 97 = 1,5 \text{ мм.}$$

Координату середины поля допуска замыкающего звена рассчитаем по выражению (4):

$$C_{A_{\Delta}} = \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot C_{A_i} = 0 + 0 - 0,045 - 0,080 - 0,055 + \\ + 0 + 0 + 0 + 0,110 = -0,070 \text{ мм.}$$

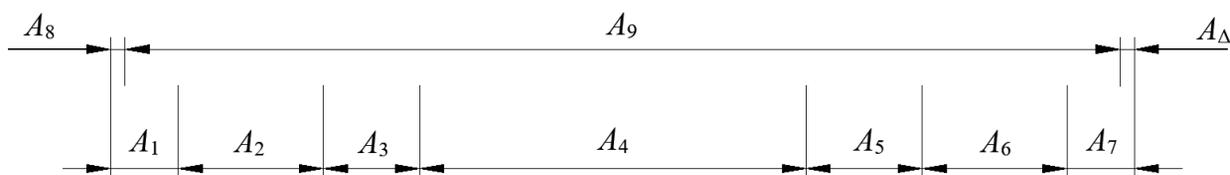


Рис. 1. Сборочная размерная цепь A : A_1, \dots, A_9 — составляющие звенья; A_{Δ} — замыкающее звено; A_1, \dots, A_7 — увеличивающие звенья; A_8, \dots, A_9 — уменьшающие звенья

Таблица 2

Параметры составляющих звеньев A_i сборочной цепи

Составляющее звено A_i	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
Размер, мм	$8 \pm 0,018$	$17 \pm 0,013$	$8_{-0,09}$	$32_{-0,16}$	$11_{-0,11}$	$17 \pm 0,013$	$8 \pm 0,018$	$2,5 \pm 0,03$	$97_{-0,22}$

Таблица 3

Оценка поля допуска $T_{A_{\Delta}}$ замыкающего звена и вероятности успешного комплектования отдельного изделия $P_{ук}(A)$ при числе изделий в выпускаемой партии $m = 40$ штук

Звено	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
Выборочное среднее $A_{иср}$	7,999	17,000	7,970	31,935	10,954	17,001	7,998	2,501	96,902
Выборочное СКО s_{A_i}	0,012	0,009	0,022	0,055	0,033	0,007	0,011	0,019	0,062
Довер-ный интервал δ_{A_i}	0,005	0,004	0,009	0,022	0,014	0,003	0,004	0,008	0,025
Допуск T_{A_i}	0,070	0,055	0,134	0,329	0,199	0,041	0,066	0,113	0,370
Вероятность $P_{A_{исм}}$	0,989	0,994	0,887	0,953	0,957	0,976	0,977	0,990	0,966
Вероятность $P_{A_{иср-ист}}$	0,864	0,864	0,864	0,864	0,864	0,864	0,864	0,864	0,864
Вероятность $P_{\delta_{A_i}}$	0,896	0,896	0,896	0,896	0,896	0,896	0,896	0,896	0,896
Условная вер-сть $P(A/A_{ид})$	0,766	0,770	0,686	0,738	0,741	0,756	0,757	0,766	0,748

Допуск замыкающего звена $T_{A_{\Delta}} = 0,492$ мм; вероятность успешного комплектования $P_{ук}(A) = 0,748$

Таблица 4

Оценка поля допуска $T_{A_{\Delta}}$ замыкающего звена и вероятности успешного комплектования отдельного изделия $P_{ук}(A)$ при числе изделий в выпускаемой партии $t = 25$ штук

Звено	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
Выборочное среднее $A_{иср}$	8,000	17,000	7,976	31,928	10,953	17,002	7,998	2,499	96,882
Выборочное СКО s_{A_i}	0,012	0,010	0,017	0,054	0,027	0,006	0,011	0,018	0,058
Довер-ный интервал δ_{A_i}	0,007	0,006	0,010	0,034	0,016	0,004	0,007	0,011	0,036
Допуск T_{A_i}	0,071	0,060	0,102	0,325	0,159	0,034	0,065	0,110	0,351
Вероятность $P_{A_{исм}}$	0,996	0,997	0,795	0,974	0,953	0,951	0,973	0,995	0,976
Вероятность $P_{A_{иср-ист}}$	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794	0,794
Вероятность $P_{\delta_{A_i}}$	0,861	0,861	0,861	0,861	0,861	0,861	0,861	0,861	0,861
Условная вер-сть $P(A/A_{ик})$	0,681	0,682	0,544	0,666	0,652	0,650	0,665	0,681	0,667

Допуск замыкающего звена $T_{A_{\Delta}} = 0,462$ мм; вероятность успешного комплектования $P_{ук}(A) = 0,654$

Таблица 5

Оценка поля допуска $T_{A_{\Delta}}$ замыкающего звена и вероятности успешного комплектования отдельного изделия $P_{ук}(A)$ при числе изделий в выпускаемой партии $t=20$ штук

Звено	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
Выборочное среднее $A_{иср}$	8,000	17,000	7,975	31,925	10,950	17,002	7,998	2,506	96,879
Выборочное СКО s_{A_i}	0,012	0,010	0,017	0,051	0,032	0,007	0,010	0,018	0,056
Довер-ный интервал δ_{A_i}	0,009	0,007	0,012	0,036	0,023	0,005	0,007	0,013	0,040
Допуск T_{A_i}	0,074	0,060	0,100	0,308	0,192	0,040	0,061	0,109	0,337
Вероятность $P_{A_{исм}}$	0,994	0,994	0,800	0,983	0,972	0,947	0,964	0,943	0,969
Вероятность $P_{A_{иср-ист}}$	0,763	0,763	0,763	0,763	0,763	0,763	0,763	0,763	0,763
Вероятность $P_{\delta_{A_i}}$	0,839	0,839	0,839	0,839	0,839	0,839	0,839	0,839	0,839
Условная вер-сть $P(A/A_{ик})$	0,637	0,637	0,512	0,630	0,622	0,607	0,618	0,604	0,621

Допуск замыкающего звена $T_{A_{\Delta}} = 0,454$ мм; вероятность успешного комплектования $P_{ук}(A) = 0,610$

Таблица 6

Оценка поля допуска $T_{A_{\Delta}}$ замыкающего звена и вероятности успешного комплектования отдельного изделия $P_{ук}(A)$ при числе изделий в выпускаемой партии $t = 15$ штук

Звено	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
Выборочное среднее $A_{иср}$	8,000	16,999	7,973	31,940	10,954	17,001	7,997	2,505	96,872
Выборочное СКО s_{A_i}	0,012	0,009	0,016	0,055	0,025	0,006	0,010	0,018	0,050
Довер-ный интервал δ_{A_i}	0,010	0,008	0,014	0,048	0,022	0,005	0,008	0,015	0,043
Допуск T_{A_i}	0,073	0,055	0,096	0,332	0,152	0,036	0,057	0,105	0,302
Вероятность $P_{A_{исм}}$	0,999	0,985	0,815	0,941	0,943	0,975	0,941	0,951	0,942
Вероятность $P_{A_{иср-ист}}$	0,714	0,714	0,714	0,714	0,714	0,714	0,714	0,714	0,714
Вероятность $P_{\delta_{A_i}}$	0,802	0,802	0,802	0,802	0,802	0,802	0,802	0,802	0,802
Условная вер-сть $P(A/A_{ик})$	0,572	0,564	0,467	0,539	0,540	0,559	0,539	0,545	0,539

Допуск замыкающего звена $T_{A_{\Delta}} = 0,435$ мм; вероятность успешного комплектования $P_{ук}(A) = 0,540$

Таблица 7

Оценка поля допуска $T_{A_{\Delta}}$ замыкающего звена и вероятности успешного комплектования отдельного изделия $P_{ук}(A)$ при числе изделий в выпускаемой партии $m = 10$ штук

Звено	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
Выборочное среднее $A_{иср}$	8,001	16,999	7,975	31,913	10,951	17,002	7,997	2,500	96,866
Выборочное СКО s_{A_i}	0,011	0,010	0,017	0,047	0,025	0,006	0,009	0,020	0,050
Довер-ный интервал δ_{A_i}	0,013	0,012	0,020	0,055	0,029	0,007	0,011	0,023	0,058
Допуск T_{A_i}	0,066	0,060	0,101	0,284	0,149	0,034	0,056	0,119	0,301
Вероятность $P_{A_{исм}}$	0,984	0,979	0,800	0,974	0,957	0,947	0,940	0,996	0,921
Вероятность $P_{A_{иср-ист}}$	0,611	0,611	0,611	0,611	0,611	0,611	0,611	0,611	0,611
Вероятность $P_{\delta_{A_i}}$	0,723	0,723	0,723	0,723	0,723	0,723	0,723	0,723	0,723
Условная вер-сть $P(A/A_{ик})$	0,435	0,433	0,354	0,430	0,423	0,419	0,415	0,440	0,407

Допуск замыкающего звена $T_{A_{\Delta}} = 0,410$ мм; вероятность успешного комплектования $P_{ук}(A) = 0,417$

Таблица 8

Оценка поля допуска $T_{A_{\Delta}}$ замыкающего звена и вероятности успешного комплектования отдельного изделия $P_{ук}(A)$ при числе изделий в выпускаемой партии $m = 5$ штук

Звено	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
Выборочное среднее $A_{иср}$	8,000	16,996	7,975	31,913	10,946	17,001	7,996	2,498	96,870
Выборочное СКО s_{A_i}	0,013	0,009	0,017	0,045	0,026	0,006	0,009	0,019	0,045
Довер-ный интервал δ_{A_i}	0,033	0,023	0,042	0,113	0,065	0,016	0,022	0,048	0,112
Допуск T_{A_i}	0,078	0,054	0,101	0,270	0,156	0,038	0,053	0,114	0,269
Вероятность $P_{A_{исм}}$	1,000	0,920	0,799	0,973	0,991	0,983	0,923	0,984	0,927
Вероятность $P_{A_{иср-ист}}$	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166
Вероятность $P_{\delta_{A_i}}$	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354
Условная вер-сть $P(A/A_{ик})$	0,059	0,054	0,047	0,057	0,058	0,058	0,054	0,058	0,054

Допуск замыкающего звена $T_{A_{\Delta}} = 0,389$ мм; вероятность успешного комплектования $P_{ук}(A) = 0,055$

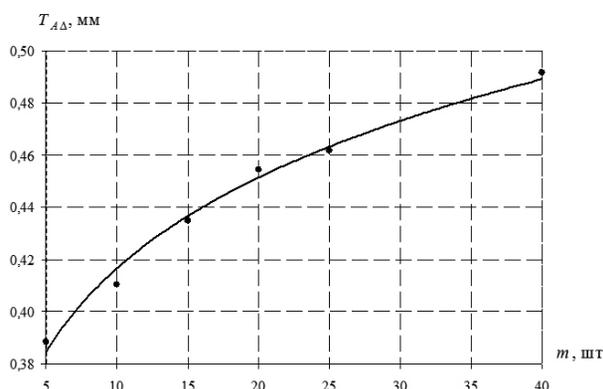


Рис. 2. Зависимость поля допуска $T_{A_{\Delta}}$ замыкающего звена от числа изделий m в выпускаемой партии:

● — экспериментальные точки

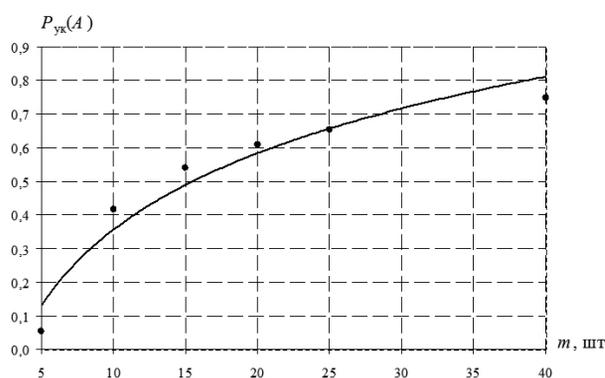


Рис. 3. Зависимость вероятности успешного комплектования отдельного изделия $P_{ук}(A)$ от числа сборочных единиц m в выпускаемой партии:

● — экспериментальные точки

Для оценки вероятности успешного комплектования отдельного изделия (рис. 1) (табл. 2) в программе MS Excel выполнили компьютерное моделирование. Генерировались нормально распределенные размеры, имеющие случайный разброс в соответствии с номинальным значением и полем допуска составляющего звена A_i (табл. 2). Число изделий в партии $m = 5; 10; 15; 20; 25; 40$ штук.

Далее по выражениям (2) – (18) проведен расчет при следующих данных: доверительная вероятность $\beta = 99\%$; в выражении (3) при 1% риска коэффициент $t = 2,57$; по выражению (14) вероятность выбора составляющего звена $P(A_i) = 1/9$.

Результаты исследования (табл. 3–8) показывают, что с увеличением числа изделий m в выпускаемой партии допуск T_{A_A} замыкающего звена расширяется (рис. 2) и вероятность успешного комплектования отдельного изделия $P_{ук}(A)$ растет (рис. 3).

Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

1. Теоретико-вероятностный метод расчета многозвенных размерных цепей обеспечивает широкие поля допусков размеров составляющих звеньев.

2. Число изделий в выпускаемой партии влияет на величину доверительного интервала истинного среднего арифметического значения размера и доверительного интервала истинного среднего квадратического отклонения размера составляющего звена сборочной цепи.

3. Предложена методика оценки вероятности успешного комплектования отдельного изделия, учитывающая число изделий в выпускаемой партии.

4. По разработанной методике проведен расчет вероятности успешного комплектования отдельного изделия при разном числе изделий в партии.

Цель исследования достигнута — оценена вероятность успешного комплектования отдельного изделия ТСН в мелкосерийном производстве, сборочная размерная цепь которого рассчитана по теоретико-вероятностному методу.

Список источников

1. Анастасиади Г.П., Окрепилов В.В., Сильников М.В. Управление качеством промышленной продукции. СПб.: «Санкт-Петербургская издательско-книготорговая фирма «Наука». 2014. 412 с.

2. Галкин М.Г., Смагин А.С. Особенности расчета технологических размерных цепей вероятностным методом // Вестник машиностроения. 2016. № 4. С. 13–17.

3. Задорина Н.А., Непомилуев В.В. Исследование робастности процесса сборки на основе метода индивидуального подбора деталей в многозвенных размерных цепях // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2020. Т. 24. № 1 (87). С. 10–16.

4. Непомилуев В.В., Олейникова Е.В., Тимофеев М.В. Обеспечение устойчивости процесса сборки на основе метода индивидуального подбора деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 11. С. 7–12.

5. Медведев О.А., Рожков Ю.В. Теоретико-вероятностный расчет сборочных размерных цепей, содержащих тонкие компенсаторы // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Машиностроение. 2011. № 4 (70). С. 50–54.

6. Польский Е.А., Сорокин С.В. Повышение надежности изделий машиностроения за счет совершенствования точностного анализа размерных цепей // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 6 (132). С. 38–48.

7. Расторгуев Г.В. Оптимизация сборочной размерной цепи на стадии проектирования // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2008. № 2. С. 29–34.

8. Расторгуев Г.А. Проверочный расчет сборочной размерной цепи // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2009. № 2. С. 42–47.

9. Фролов В.В. Проектный расчет размерных цепей на основе имитационного моделирования // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2019. № 2 (37). С. 76–88.

10. Андрушкин А.Ю., Изюмова Е.А., Буцикин Е.Б. Метод уточняемого компенсирующего слоя и его применение для достижения размер-

ной точности изделия с многослойным покрытием // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 11–12 (185–186). С. 140–148.

11. Кочеткова Т.П. Методы расчета размерных цепей: учеб. пособие. СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2018. 50 с.

12. Черкашина О.С., Коробко С.И., Трищ Р.М. Расчет сборочных размерных цепей в условиях высокоточного производства // Машинобудування: Збірник наукових праць. 2009. № 4. С. 161–169.

13. Черкашина О.С., Коробко С.И., Трищ Р.М. Стандартизация расчета сборочных размерных цепей в машиностроении путем вероятностного суммирования // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2008. Т. 6. № 6 (36). С. 24–28.

14. Ивин Е.А., Курбачкий А.Н., Артамонов Д.В. Учебно-методическое пособие по математической статистике: для социально-экономических специальностей. Вологда: ИСЭРТ РАН, 2017. 141 с.

References

1. Anastasiadi G.P., Okrepilov V.V., Silnikov M.V. Quality management of industrial products. St. Petersburg: St. Petersburg publishing and bookselling company «Nauka», 2014. 412 p.

2. Galkin M.G., Smagin A.S. Features of calculation of technological dimensional chains by the probabilistic method // Bulletin of mechanical engineering. 2016. No 4. Pp. 13–17.

3. Zadorina N.A., Nepomiluyev V.V. Investigation of the robustness of the assembly process based on the method of individual selection of parts in multi-link dimensional chains // Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University. 2020. Vol. 24. No 1 (87). Pp. 10–16.

4. Nepomiluyev V.V., Oleinikova E.V., Timofeev M.V. Ensuring the stability of the assembly process based on the method of individual selection of parts // Assembly in mechanical engineering, instrumentation. 2015. No 11. Pp. 7–12.

5. Medvedev O.A., Rozhkov Yu.V. Theoretical and probabilistic calculation of assembly dimen-

sional circuits containing thin compensators // Bulletin of the Brest State Technical University. Series: Mechanical Engineering. 2011. No 4 (70). Pp. 50–54.

6. Polsky E.A., Sorokin S.V. Improving the reliability of machine-building products by improving the precision analysis of dimensional chains // High-tech technologies in mechanical engineering. 2022. No 6 (132). Pp. 38–48.

7. Rastorguev G.V. Optimization of the assembly dimensional chain at the design stage // Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Research. 2008. No 2. Pp. 29–34.

8. Rastorguev G.A. Verification calculation of the assembly dimensional chain // Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Research. 2009. No 2. Pp. 42–47.

9. Frolov V.V. Design calculation of dimensional circuits based on simulation modeling // Bulletin of the Vitebsk State Technological University. 2019. No 2 (37). Pp. 76–88.

10. Andryushkin A.Yu., Izyumova E.A., Bucikin E.B. The method of the specified compensating layer and its application to achieve dimensional accuracy of a product with a multilayer coating // Questions of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 11–12 (185–186). Pp. 140–148.

11. Kochetkova T.P. Methods of calculating dimensional chains: textbook. Baltic State Technical University St. Petersburg Univ. 2018. 50 p.

12. Cherkashina O.S., Korobko S.I., Trishch R.M. Calculation of assembly dimensional chains in conditions of high-precision production // Mashinobuduvannya: Zbirnik naukovikh prats. 2009. No 4. Pp. 161–169.

13. Cherkashina O.S., Korobko S.I., Trishch R.M. Standardization of calculation of assembly dimensional circuits in mechanical engineering by probabilistic summation // Eastern European Journal of Advanced Technologies. 2008. Vol. 6. No 6 (36). Pp. 24–28.

14. Ivin E.A., Kurбatsky A.N., Artamonov D.V. Educational and methodical manual on mathematical statistics: for socio-economic specialties. Вологда: ISERT RAS, 2017. 141 p.