

## ТЕОРЕТИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ ЧИСЛА ТОНКИХ РАВНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ ПРИ ДОСТИЖЕНИИ ТОЧНОСТИ СБОРКИ МЕТОДОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

О. А. Медведев

К. т. н., доцент, доцент кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей  
Брестского государственного технического университета, г. Брест, Республика Беларусь, e-mail: olanmed56@gmail.com

### Реферат

В статье рассматривается методика расчета размеров тонких компенсаторов одинаковой длины (прокладок), используемых для достижения точности замыкающих звеньев линейных сборочных размерных цепей машин методом регулирования. Методика позволяет обоснованно определять число и параметры точности компенсаторов в комплекте на одно изделие и снизить долю бракованных изделий за счет учета возможных погрешностей сборочной оснастки и сборочных работ. Методика может быть полезна инженерам, разрабатывающим техпроцессы сборки машин.

**Ключевые слова:** компенсатор тонкий, точность, метод регулирования, методика, изделие, сборка.

### THEORETICAL AND PROBABILISTIC CALCULATION OF THE NUMBER OF THIN EQUAL COMPENSATORS WHEN ACHIEVING ASSEMBLY ACCURACY BY THE REGULATION METHOD

O. A. Medvedev

### Abstract

The article discusses a method for calculating the dimensions of thin expansion joints of the same length (spacers) used to achieve the accuracy of the closing links of linear assembly dimensional chains of machines by the control method. The technique makes it possible to reasonably determine the number and accuracy parameters of compensators in a set for one product and reduce the proportion of defective products by taking into account possible errors in assembly equipment and assembly work. The technique can be useful for engineers developing technical processes for assembling machines.

**Keywords:** compensator thin, precision, control method, technique, product, assembly.

### Введение

Наборы из разного числа тонких прокладок (компенсаторов) равной толщины широко применяются в машиностроении для достижения точности сборки методом регулирования. Такой набор специально вводится в линейную сборочную конструкторскую размерную цепь машины. Изменением числа компенсаторов в наборе ступенчато компенсируется суммарное отклонение размеров деталей, входящих как составляющие звенья в сборочную конструкторскую размерную цепь. При изготовлении деталей указанные размеры можно выдерживать в пределах экономически приемлемых допусков, сумма которых превышает допуск замыкающего звена размерной цепи, заданный в технических условиях на сборку. При этом за счет допуска замыкающего звена можно компенсировать только часть суммарного поля рассеяния составляющих звеньев (величины компенсации), которая является ступенью компенсации. Без учета погрешностей изготовления компенсаторов и погрешностей определения, требуемого в конкретном экземпляре машины, размера набора компенсаторов, ступень компенсации равна допуску замыкающего звена. При использовании набора из одного компенсатора, толщиной равной ступени компенсации, аналогично можно компенсировать еще такую же часть величины компенсации, примыкающую к первой, и так далее.

Размер набора компенсаторов, требуемый для конкретного экземпляра машины, обычно определяется измерением полости под этот набор, сформированной при предварительной сборке экземпляра машины без компенсаторов. При этом на место замыкающего звена устанавливается его материальный эталон, размер которого равен желаемому значению замыкающего звена (обычно среднему в пределах допуска). Число компенсаторов в требуемом наборе, для отдельного экземпляра машины, равно частному от деления размера измеренной полости на размер одного компенсатора. После частичной разборки экземпляра изделия эталон удаляется и выполняется окончательная сборка этого объекта с принятым набором компенсаторов.

Индивидуальным выбором компенсатора устраняется прямая зависимость замыкающего звена от остальных составляющих звеньев,

а отклонение замыкающего звена от его среднего значения будет равно отклонению размера набора тонких компенсаторов от размера полости, которая измерялась при предварительной сборке.

### Постановка задач исследования

Основной задачей, которая решается при расчетах размерных цепей в случае достижения точности их замыкающих звеньев методом регулирования, является расчет величины компенсации (части суммы допусков составляющих звеньев, подлежащей компенсации путем изменения размера компенсатора), ступени компенсации, минимально достаточного числа компенсаторов в наборе на одно изделие, номинальных размеров и допуска компенсаторов. Многолетний опыт использования в учебном процессе по дисциплине «Технология машиностроения» традиционных методик расчета этих параметров [1, 2, 3, и др.] показал их недостаточную обоснованность и рациональность, что позволяет их использовать только для предварительных расчетов.

Проанализируем основные положения указанных методик. Величину компенсации предлагается определять по формуле

$$V_K = \sum_{j=1}^n TA_j - TA_{\Delta}, \quad (1)$$

где  $TA_j$  – расширенный, экономически приемлемый допуск  $j$ -го составляющего звена;

$TA_{\Delta}$  – требуемый допуск замыкающего звена;

$n$  – число составляющих звеньев в цепи.

При этом в первое слагаемое предписывается включать и расширенный экономически приемлемый допуск компенсатора, определенный аналогично допускам других составляющих звеньев.

Такое определение величины компенсации не оправдано по следующим причинам:

– величина компенсации и размер полости под компенсатор формируются в результате предварительной сборки изделия, когда

компенсатор не используется, а на место замыкающего звена устанавливается эталон. Поэтому допуск компенсатора не должен учитываться при определении величины компенсации;

- неоправданное увеличение величины компенсации путем включения в нее расширенного допуска компенсатора приводит к необоснованному увеличению числа компенсаторов в комплекте на одно изделие.

Кроме того, предлагаемая методика расчетов не учитывает влияние на точность замыкающего звена конструкторской размерной цепи таких погрешностей, возникающих при определении размера требуемого компенсатора, как погрешности сборочной оснастки и сборочных работ (погрешности эталона, установки эталона, измерения полости под компенсатор, выбора компенсатора).

Более адекватной представляется методика расчета величины компенсации для достижения точности сборки методом регулирования, описанная в [3]. Однако и в ней имеются неточности:

- не выявляются рациональные схемы компенсации допусков составляющих звеньев с целью минимизации числа компенсаторов в наборе;
- в величину компенсации, кроме допусков составляющих звеньев конструкторской размерной цепи, включаются погрешности сборочной технологической оснастки, которые не формируют поле рассеивания полости под компенсатор при окончательной сборке. Кроме того, эти погрешности не могут быть компенсированы выбором компенсатора, так как влияют на этот выбор и могут иметь разные случайные значения при сборке одного экземпляра изделия. Погрешности сборочных работ и оснастки влияют на формирование размера выбранного компенсатора, следовательно, формируют фактическое поле рассеивания замыкающего звена конструкторской размерной цепи и могут быть компенсированы только за счет его допуска  $TA_{\Delta}$ . Необоснованное включение этих погрешностей в величину компенсации ведет к неоправданному увеличению числа компенсаторов в наборе и не позволяет составить объективное условие достижения точности сборки;
- допуск компенсатора назначается без учета погрешностей формирования размера выбираемого набора компенсаторов, и, следовательно, не гарантируется точность сборки при рассчитанном размере и принятом допуске компенсатора;
- при использовании тонких компенсаторов не учитывается тот факт, что допуск набора из нескольких компенсаторов больше допуска одного компенсатора;
- при определении величины компенсации, размеров компенсаторов и их погрешностей не учитывается случайный характер этих величин;
- не рассматриваются вопросы рационального определения минимально достаточное количество компенсаторов каждой ступени для собираемой партии изделий.

С учетом сказанного можно сделать вывод о недостаточной объективности и рациональности рассмотренных методик расчета компенсаторов и необходимости усовершенствования методики расчета сборочных размерных цепей при достижении точности сборки методом регулирования. Это позволит обоснованно установить требования к точности сборочных работ и сборочной оснастки, а также рационально определить число требуемых компенсаторов в комплекте на одно изделие и на партию собираемых изделий.

#### Разработка рациональных схем компенсации суммарного поля рассеивания составляющих звеньев

Системный анализ влияния компенсаторов на замыкающие звенья линейных сборочных конструкторских размерных цепей для машин разного назначения позволил разработать несколько типовых схем компенсации расширенных допусков составляющих звеньев, наглядно отражающих это влияние для всех возможных случаев. На основе этих схем можно установить связи между предельными размерами набора компенсаторов, замыкающего звена, составляющих звеньев, погрешностей формирования размера набора компенсаторов, погрешности изготовления компенсаторов.

Каждая из таких схем построена на основе трехзвенной линейной размерной цепи, математически тождественной реальной сборочной размерной цепи, и включает суммарное составляющее звено  $A_{\Sigma}$ ,

компенсатор  $K$  и замыкающее звено  $A_{\Delta}$ . Среднее значение суммарного составляющего звена является алгебраической суммой средних значений всех увеличивающих и уменьшающих составляющих звеньев реальной цепи (кроме компенсатора). Его поле рассеивания  $TA_{\Sigma}$  равно сумме полей рассеивания составляющих звеньев (кроме компенсатора), определенной по правилу сложения случайных величин.

При этом все многообразие реальных конструкторских размерных цепей может быть сведено к трем вариантам математически тождественных трехзвенных цепей, отличающихся по влиянию компенсатора и суммарного составляющего звена на замыкающее звено: 1) увеличивающее суммарное составляющее звено и уменьшающий компенсатор; 2) увеличивающее суммарное составляющее звено и увеличивающий компенсатор; 3) уменьшающее суммарное составляющее звено и увеличивающий компенсатор. Третий вариант следует исключить из рассмотрения, так как он предполагает использование в качестве компенсатора достаточно крупной охватывающей детали, а не тонкой прокладки.

В схеме компенсации поля рассеивания составляющих звеньев трехзвенную конструкторскую цепь, тождественную реальной цепи, представим предельными размерами и полями рассеивания замыкающего и суммарного составляющего звеньев (рисунки 1, 2). Поле рассеивания суммарного составляющего звена  $TA_{\Sigma}$  разделим на несколько одинаковых частей, равных ступени компенсации  $C$ . Таким образом число ступеней компенсации определяется по формуле

$$N = \frac{TA_{\Sigma}}{C} \quad (2)$$

Средние размеры наборов компенсаторов должны связывать середину допуска замыкающего звена с серединами соответствующих ступеней компенсации в пределах поля рассеивания суммарного составляющего звена. Для того чтобы набор тонких компенсаторов при любом их числе оставался уменьшающим (или увеличивающим) и для того чтобы максимальное число требуемых тонких компенсаторов в наборе на одно изделие было на единицу меньше числа ступеней компенсации, надо середину  $TA_{\Delta}$  совместить с серединой первой ступени компенсации. Такое частичное перекрытие  $TA_{\Delta}$  и  $TA_{\Sigma}$  всегда можно сделать путем корректировки номинала любого из составляющих звеньев конструкторской цепи. Это позволяет без компенсатора, за счет допуска замыкающего звена, компенсировать часть суммарного поля рассеивания составляющих звеньев, примыкающую к его границе и равную ступени компенсации. Для этого увязка предельных размеров суммарного составляющего звена с полем допуска замыкающего звена конструкторской цепи производится по следующим уравнениям:

для уменьшающего компенсатора

$$A_{\Sigma min} = A_{\Delta cp} - c/2; \quad (3)$$

для увеличивающего компенсатора

$$A_{\Sigma max} = A_{\Delta cp} + c/2. \quad (4)$$

Погрешности сборочных работ и оснастки представим в схеме компенсации в виде элементов технологической сборочной размерной цепи. Как отмечалось ранее, при окончательной сборке изделия с выбранным набором компенсаторов отклонение замыкающего звена конструкторской цепи от эталона будет равно отклонению размера выбранного набора компенсаторов от размера полости под компенсатор, сформированной и измеренной при предварительной сборке. Для определения поля рассеивания этого отклонения следует выявить и решить технологическую сборочную размерную цепь, которая формируется на этапе предварительной сборки изделия. Замыкающим звеном в ней является размер полости под набор компенсаторов, а составляющими звеньями, кроме размеров деталей изделия, также являются размеры используемой сборочной оснастки (эталона замыкающего звена конструкторской цепи) и погрешности выполнения сборочных работ.

Отклонение размера выбранного набора компенсаторов от размера полости под компенсатор складывается из отклонений звеньев

технологической цели, отсутствующих в конструкторской цепи и звеньев, которые при предварительной сборке конкретного экземпляра изделия могут приобретать случайные значения, отличающиеся от их значений в конструкторской цепи (погрешность изготовления материального эталона среднего значения замыкающего звена  $\epsilon_{\Sigma}$ , погрешность установки эталона  $\epsilon_{УЭ}$ , погрешность измерения полости под компенсатор  $\epsilon_U$ , погрешность изготовления набора из  $n$  компенсаторов  $nTK$ ), погрешность выбора набора компенсатора ( $\epsilon_B$ ). Погрешности таких звеньев могут быть компенсированы только за счет допуска замыкающего звена конструкторской цепи, а не выбором набора компенсаторов.

Технологическую цепь представим в схеме компенсации указанными погрешностями, которые в сумме не должны превышать допуска замыкающего звена конструкторской цепи  $TA_{\Delta}$ . Расположим их в пределах допуска замыкающего звена  $TA_{\Delta}$  симметрично относительно его середины, потому что, при размере эталона равном  $A_{\Delta c}$ , середина поля рассеивания размера полости под компенсатор будет соответствовать середине поля рассеивания замыкающего звена. На схемах компенсации (рисунки 1 и 2) сумма  $\epsilon_{\Sigma}$ ,  $\epsilon_{УЭ}$ ,  $\epsilon_U$  обозначена как погрешность определения размера набора компенсатора  $\epsilon_{PK}$ .

Максимальное возможное значение погрешности выбора набора тонких компенсаторов равно ступени компенсации, то есть толщине одного тонкого компенсатора. С такой погрешностью измеренное значение полости под компенсатор воспроизводится на выбранном наборе компенсаторов при самом неблагоприятном сочетании размера измеренной полости и границы ближайших ступеней компенсации, при условии строго соблюдения сборщиком технологической дисциплины.

Так как ступень компенсации равна средней толщине одного тонкого компенсатора, то эта толщина, наряду с погрешностями сборочных работ, сборочной оснастки и допуском изготовления компенсаторов, определяет точность сборки. Изготавливать и использовать компенсаторы с толщиной менее 0,05 мм затруднительно из-за их малой жесткости. Поэтому использование компенсаторов равной толщины для выдерживания  $TA_{\Delta} \leq 0,05$  мм обычно невозможно.

Схемы компенсации, учитывающие эти особенности, приведены на рисунках 1 и 2 (для уменьшающего и увеличивающего компенсатора соответственно).

### Взаимосвязь точности замыкающего звена, компенсаторов и сборочной оснастки

Проведенный анализ формирования точности замыкающего звена методом регулирования и предложенные схемы компенсации поля рассеивания составляющих звеньев конструкторской цепи позволяют использовать теоретико-вероятностный метод определения параметров точности компенсаторов и сборочной оснастки.

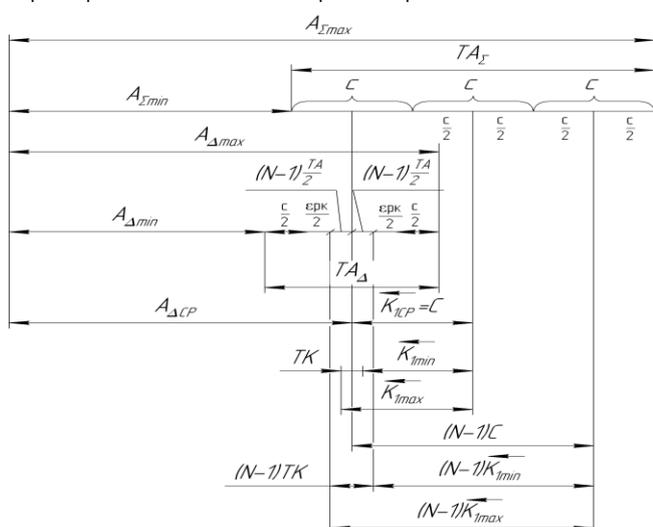


Рисунок 1 – Схема компенсации полей рассеивания составляющих звеньев регулированием комплектом одинаковых тонких уменьшающих компенсаторов

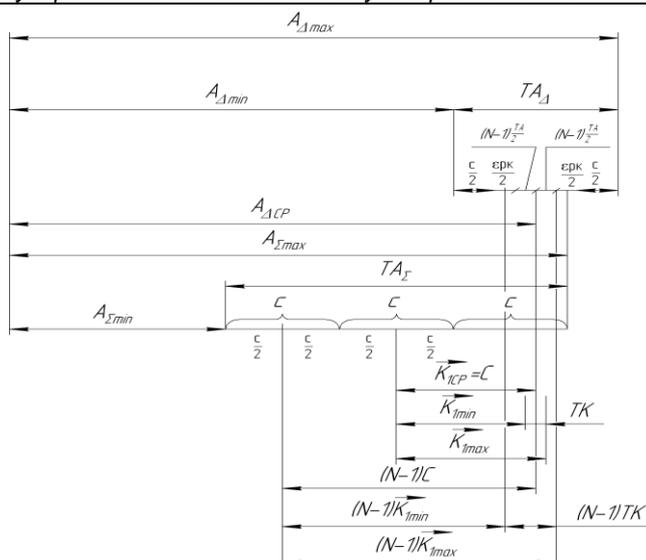


Рисунок 2 – Схема компенсации полей рассеивания составляющих звеньев регулированием комплектом одинаковых тонких увеличивающих компенсаторов

Его использование позволит получить преимущества, аналогичные тем, которые получают при достижении точности сборки методом неполной взаимозаменяемости [1, 2], то есть допуская небольшую экономически приемлемую долю бракованных изделий существенно снизить число компенсаторов в комплекте на одно изделие или снизить требования к точности сборочной оснастки.

Для составления условия достижения точности замыкающего звена на основе теоретико-вероятностного подхода будем считать звенья технологической размерной цепи случайными величинами, сумма которых определяет поле рассеивания суммарной погрешности формирования размера набора компенсаторов, а, следовательно, и замыкающего звена конструкторской размерной цепи. С учетом правила сложения полей рассеивания случайных величин [1]

$$\omega_{\Delta}^2 = t_{\Delta}^2 \cdot \sum_{j=1}^{n+m} \lambda_j^2 \cdot \omega_j^2, \quad (5)$$

где  $\omega_{\Delta}$  – поле рассеивания суммарной случайной величины;

$t_{\Delta}$  – коэффициент риска;

$\lambda_j$  – коэффициент относительного рассеивания  $j$ -й случайной величины;

$\omega_j$  – поле рассеивания  $j$ -й случайной величины.

Коэффициент риска замыкающего звена  $t_{\Delta}$  в формуле (5) учитывает допустимую долю бракованных изделий. Его можно определить по таблице значений функции Лапласа  $\Phi(t_{\Delta})$ . Для определения полного поля рассеивания (6б) суммарной погрешности формирования размера набора компенсаторов принимаем  $t_{\Delta} = 3$ . В это поле попадает 99,73 % реализаций этой суммарной погрешности. Заменив в формуле (5)  $\omega_{\Delta}$  на  $TA_{\Delta}$  и  $\omega_j$  на погрешности, определяющие точность размера набора компенсаторов, получим условие достижения точности замыкающего звена конструкторской размерной цепи  $A_{\Delta}$  методом регулирования набором тонких равных компенсаторов для 99,73 % собираемых изделий

$$TA_{\Delta}^2 = (\lambda_{PK}^2 \cdot \epsilon_{PK}^2 + \lambda_c^2 \cdot c^2 + \lambda_k^2 \cdot (N-1) \cdot TK^2). \quad (6)$$

При составлении формулы (5), учтена наибольшая величина погрешности размера набора компенсаторов, возникающая при использовании набора с максимально возможным числом компенсаторов в одном изделии  $N-1$ .

Также точность  $A_{\Delta}$  обеспечивается для тех случаев использования тонких компенсаторов, при которых левая часть выражения (6) больше правой. Однако для этого потребуются использовать более точные и дорогие средства технологического оснащения и компенсаторы, что снизит экономическую эффективность сборки.

Заменив в уравнении (6)  $N$  на  $TA_{\Sigma}/c$ , после преобразований получим кубическое уравнение для расчета максимально допустимо-го значения ступени компенсации  $C$

$$\lambda_c^2 \cdot c^3 + \left[ \lambda_{pk}^2 \cdot \varepsilon_{pk}^2 - \left( \frac{TA_{\Delta}}{t_{\Delta}} \right)^2 - \lambda_k^2 \cdot TK^2 \right] \cdot c + TA_{\Sigma} \cdot \lambda_k^2 \cdot TK^2 = 0. \quad (7)$$

После расчета корней кубического уравнения (7), один из них, имеющий физический смысл (положительное, натуральное число), проверить по условию (6) и скорректировать значения полей рассеяния составляющих звеньев конструкторской и технологической размерных цепей так, чтобы значение  $N$  получалось целым.

### Определение числа компенсаторов, требуемых для партии собираемых изделий

Определяя общее число компенсаторов, предварительно изготавливаемых для партии собираемых изделий из  $P$  штук, при известном числе ступеней компенсации  $N$ , на производстве обычно исходят из того, что заранее неизвестно, сколько компенсаторов потребуется включить в набор для конкретного экземпляра изделия. Поэтому для каждого экземпляра изделия до начала сборки партии изделий изготавливается комплект из  $N-1$  (максимально требуемое число) тонких компенсаторов. В таком случае общее число компенсаторов для всей партии составит

$$Q = (N - 1) \cdot P. \quad (8)$$

Однако из каждого комплекта, включающего  $N-1$  компенсатор, в процессе сборки будет использована лишь некоторая их часть, соответствующая той ступени компенсации, к которой будет относиться собираемый экземпляр изделия. При этом остальные компенсаторы комплекта окажутся лишними, и нет гарантии, что все они потребуются в дальнейшем, так как аналогичное количество компенсаторов будет подготовлено и для следующей партии изделий.

Снизить расходы на изготовление компенсаторов можно, если учесть, что суммарное составляющее звено, как сумма большого числа составляющих случайных величин в пределах партии собираемых изделий, подчиняется нормальному закону распределения, независимо от законов распределения слагаемых. При этом значения  $A_{\Sigma}$ , близкие к середине поля его рассеяния, составляют подавляющее большинство. Доля изделий, которая будет относиться к определённой ступени компенсации, может быть определена на основе положений теории вероятностей при известных параметрах распределения  $A_{\Sigma}$ .

Среднеквадратическое отклонение суммарного составляющего звена можно определить по формуле

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{TA_{\Sigma}}{6}. \quad (9)$$

Для определения доли экземпляров изделий, у которых  $A_{\Sigma}$  попадает в пределы каждой ступени компенсации, можно воспользоваться функцией Лапласа, которая показывает вероятность попадания нормально распределенной случайной величины в интервал, выраженный числом среднеквадратических отклонений и отсчитываемый от середины поля рассеяния случайной величины [2, 3]. Применительно к схемам компенсации, представленных на рисунках 1, 2, функцию Лапласа можно использовать для определения вероятности попадания значений  $A_{\Sigma}$  в интервал между серединой  $TA_{\Sigma}$  и границей определенной ступени компенсации. Аргументом функции Лапласа  $\Phi(t)$  является коэффициент риска  $t$ , который в данном случае можно определить делением указанного интервала на среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{\Sigma}$ .

С учетом изложенного для первой и последней ( $N$ -й) ступеней компенсации коэффициент риска следует определять по формуле:

$$t_1 = t_N = \frac{TA_{\Sigma}/2 - c}{\sigma_{\Sigma}} = \frac{3\sigma_{\Sigma} - 6\sigma_{\Sigma}/N}{\sigma_{\Sigma}} = 3 - \frac{6}{N}. \quad (10)$$

Значение функции Лапласа  $\Phi(t)$  для полученного аргумента  $t$  можно определить по специальной таблице [1, 2, 3]. Учитывая, что вероятность попадания значений  $A_{\Sigma}$  в половину поля его рассеяния равна 0,5, выражение для определения доли изделий с  $A_{\Sigma}$  в пределах первой и  $N$ -й ступени компенсации  $q_1$  и  $q_N$  получим, вычитая из 0,5 значение  $\Phi(t_1)$ :

$$q_1 = q_N = 0,5 - \Phi(t_1) = 0,5 - \Phi\left(3 - \frac{6}{N}\right). \quad (11)$$

Для второй и  $N-1$ -й ступеней компенсации коэффициент риска следует определять по формуле

$$t_2 = t_{N-1} = \frac{TA_{\Sigma}/2 - 2c}{\sigma_{\Sigma}} = \frac{3\sigma_{\Sigma} - 12\sigma_{\Sigma}/N}{\sigma_{\Sigma}} = 3 - \frac{12}{N}. \quad (12)$$

Доли изделий с  $A_{\Sigma}$  в пределах второй и  $N-1$ -й ступени компенсации  $q_2$ ,  $q_{N-1}$  получим, вычитая из  $\Phi(t_1)$  значение  $\Phi(t_2)$ :

$$q_2 = q_{N-1} = \Phi(t_1) - \Phi(t_2) = \Phi\left(3 - \frac{6}{N}\right) - \Phi\left(3 - \frac{12}{N}\right). \quad (13)$$

В общем случае доли изделий с  $A_{\Sigma}$  в пределах  $i$ -й и  $N-(i-1)$ -й ступени компенсации определяются по формуле

$$q_i = q_{N-i+1} = \Phi(t_{i-1}) - \Phi(t_i) = \Phi\left(3 - \frac{6(i-1)}{N}\right) - \Phi\left(3 - \frac{6 \cdot i}{N}\right). \quad (14)$$

При четном числе ступеней компенсации  $N$  в пределах поля рассеяния  $A_{\Sigma}$  расчеты долей изделий по формуле (14) следует выполнить для ступеней с номерами  $i \leq N/2$ , пока  $\Phi(t_i) \geq 0$ .

При нечетном числе ступеней  $N$  расчеты долей изделий по формуле (14) следует выполнить для ступеней с номерами  $1 \leq i \leq N/2 - 0,5$ . Доля изделий с значениями  $A_{\Sigma}$  в пределах средней ступени компенсации с номером  $i = N/2 + 0,5$  следует определять по формуле

$$q_{N/2+0,5} = 2 \cdot \Phi\left(\frac{3}{N}\right). \quad (15)$$

Число собираемых изделий, имеющих значение  $A_{\Sigma}$  в пределах отдельной ступени компенсации, можно определить как произведение соответствующей доли изделий на общее число изделий собираемой партии  $P$ :

$$P_i = q_i \cdot P. \quad (16)$$

Число компенсаторов, требуемых для изделий, относящихся к  $i$ -ой ступени (при  $i - 1$  компенсаторе на каждое изделие):

$$Q_i = (i - 1) \cdot q_i \cdot P. \quad (17)$$

Общее число требуемых тонких компенсаторов для партии из  $P$  изделий при четном числе ступеней компенсации получим, подставляя в (17) выражение (14) и суммируя полученные слагаемые (отдельно для первой половины  $TA_{\Sigma}$  и отдельно для второй половины  $TA_{\Sigma}$ )

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i = P \cdot \sum_{i=1}^{N/2} (i-1) \cdot \left[ \Phi \left( 3 - \frac{6(i-1)}{N} \right) - \Phi \left( 3 - \frac{6 \cdot i}{N} \right) \right] + \\ + P \cdot \sum_{i=N/2+1}^N (i-1) \cdot \left[ \Phi \left( 3 - \frac{6(N-i)}{N} \right) - \Phi \left( 3 - \frac{6 \cdot (N-i+1)}{N} \right) \right]. \quad (18)$$

Общее число требуемых тонких компенсаторов для партии из  $P$  изделий при нечетном числе ступеней компенсации получаем аналогично выражению (18) с добавлением числа компенсаторов для изделий, относящихся к средней ступени компенсации с учетом формулы (15)

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i = P \cdot \sum_{i=1}^{N/2-0,5} (i-1) \cdot \left[ \Phi \left( 3 - \frac{6(i-1)}{N} \right) - \Phi \left( 3 - \frac{6 \cdot i}{N} \right) \right] + \\ + 2 \cdot P \cdot \left( \frac{N}{2} - 0,5 \right) \cdot \Phi \left( \frac{3}{N} \right) + \\ + P \cdot \sum_{i=N/2+1}^N (i-1) \cdot \left[ \Phi \left( 3 - \frac{6(N-i)}{N} \right) - \Phi \left( 3 - \frac{6 \cdot (N-i+1)}{N} \right) \right]. \quad (19)$$

#### Программное обеспечение для расчета ступени компенсации и числа компенсаторов

Для возможности использования полученных сложных зависимостей в практике проектирования техпроцессов сборки разработано программное обеспечение для решения кубического уравнения при расчете ступени компенсации и для расчета числа тонких компенсаторов, требуемых для сборки партии изделий.

В приложении Excel на языке Visual Basic for Application (VBA) разработана компьютерная программа, вычисляющая корни уравнения (7) ( $Y1=C_1$ ,  $Y2=C_2$ ,  $Y3=C_3$ ) по формулам Кардано. Исходными данными для расчёта являются:  $TA_{\Sigma}$  – суммарный допуск составляющих звеньев конструкторской размерной цепи (мм);  $TA_{\Delta}$  – допуск замыкающего звена (мм); погрешность эталона (мм); погрешность установки эталона (мм); погрешность измерений (мм);  $\lambda^2$  – коэффициент закона распределения. При запуске программы в рабочем окне появляется исходная таблица с кнопкой вызова формы для ввода исходных данных. Выбор закона распределения производится из выпадающего меню. Коэффициенты относительного рассеяния (для закона равной вероятности  $\lambda^2 = 1/3$ , для закона Симпсона  $\lambda^2 = 1/6$ , для нормального закона распределения  $\lambda^2 = 1/9$ ) занесены в таблицу в защищенные ячейки, откуда затем и происходит их считывание. В поле "Погрешность размера компенсатора" происходит автоматический расчет допуска толщины компенсатора при вводе исходных данных в поля: "Погрешность эталона"; "Погрешность установки эталона"; "Погрешность измерений". При щелчке по кнопке "Расчёт" происходит вызов формы результатов расчёта корней кубического уравнения.

#### Заключение

Многочисленные расчеты числа компенсаторов для размерных цепей плунжерных насосов, червячных редукторов и других изделий, выполненных методом максимума-минимума по методике, изложенной в [4], и предлагаемым теоретико-вероятностным методом, показали, что, рискуя 3 изделиями из 1000 (при коэффициенте риска  $t_{\Delta} = 3$ ), можно сократить число требуемых компенсаторов, в среднем, в полтора раза. Таким образом, предлагаемая методика теоретико-вероятностного расчета компенсаторов позволяет избежать необоснованно высоких требований к точности сборочной оснастки, сократить число компенсаторов в наборе на одно изделие и партию изделий и, следовательно, сократить себестоимость сборки. Она может быть полезна инженерам-технологам, занимающимся проектированием технологических процессов сборки машин.

#### Список цитированных источников

1. Допуски и посадки : справочник : в 2 ч. / М. А. Палей [и др.] – СПб. : Политехника, 2001. – Часть 2. – 608 с.
2. Проектирование технологических процессов сборки машин : учебник / под общ. ред. А. А. Жолобова. – Минск : Новое знание, 2005. – 410 с.
3. Технология машиностроения (специальная часть) : учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. А. Гусев [и др.] – М. : Машиностроение, 1986. – 480 с.
4. Медведев, О. А. Обоснование выбора технологической оснастки для достижения точности сборки машин методом регулирования неподвижных компенсаторов / О. А. Медведев, П. Н. Ковальчук // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2008. – № 4 : Машиностроение. – С. 40–44.

#### References

1. Dopuski i посадки : spravochnik : v 2 ch. / M. A. Palej [i dr.]. – SPb. : Politekhnik, 2001. – CHast' 2. – 608 s.
2. Proektirovanie tekhnologicheskikh processov sborki mashin : uchebnik / pod obshch. red. A. A. Zholobova. – Minsk : Novoe znanie, 2005. – 410 s.
3. Tekhnologiya mashinostroeniya (special'naya chast') : uchebnik dlya mashinostroitel'nykh special'nostej vuzov / A. A. Gusev [i dr.]. – M. : Mashinostroenie, 1986. – 480 s.
4. Medvedev, O. A. Obosnovanie vybora tekhnologicheskoy osnastki dlya dostizheniya tochnosti sborki mashin metodom regulirovaniya nepodviznykh kompensatorov / O. A. Medvedev, P. N. Koval'chuk // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2008. – № 4 : Mashinostroenie. – S. 40–44.

Материал поступил в редакцию 17.03.2022