

УДК 621.91.002

РАСЧЕТ ТОЛЩИН КОМПЕНСАТОРОВ – ЧЛЕНОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ПРОГРЕССИИ С УЧЕТОМ ПОГРЕШНОСТЕЙ СБОРОЧНЫХ РАБОТ ПРИ ДОСТИЖЕНИИ ТОЧНОСТИ СБОРКИ МАШИН МЕТОДОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

О. А. Медведев¹, С. В. Савчук²

¹ К. т. н., доцент, доцент кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: olanmed56@gmail.com

² К. т. н., доцент, заведующий кафедрой машиноведения УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: sergeyskb@tut.by

Реферат

В статье рассматривается методика рационального определения толщин неподвижных тонких компенсаторов, используемых для достижения точности сборки машин методом регулирования. Для сокращения затрат на изготовление компенсаторов значения их толщин в комплекте на одно изделие целесообразно подчинить геометрической прогрессии со знаменателем 2. Это позволяет при выборочном сложении толщин компенсаторов получить толщину набора компенсаторов любой кратности по отношению к ступени компенсации. Для объективного определения ступени компенсации, при использовании компенсаторов – членов геометрической прогрессии, составлено математическое условие достижения точности сборки, учитывающее влияние технологических факторов на формирование размера компенсатора, а, следовательно, на замыкающее звено сборочной конструкторской размерной цепи. С целью наглядного представления взаимосвязи предельных значений замыкающего звена, составляющих звеньев и компенсатора разработаны рациональные схемы компенсации рассеивания суммы составляющих звеньев. Схемы учитывают встречающиеся на практике возможные варианты влияния суммарного составляющего звена и компенсатора на замыкающее звено. На основе условия достижения точности замыкающего звена разработаны уравнения для расчета ступени компенсации и числа компенсаторов в комплекте для одного экземпляра собираемого изделия. Для облегчения использования предлагаемой методики на производстве результаты расчетов ступени компенсации и числа компенсаторов для наиболее характерных значений параметров звеньев реальных размерных цепей представлены в виде таблиц. Реализация предлагаемой методики позволяет повысить объективность определения ступени компенсации и сократить число компенсаторов в комплекте на одно изделие в 3–4 раза по сравнению с числом тонких компенсаторов одинаковой толщины. Она может быть полезна инженерам-технологам, занимающимся проектированием технологических процессов сборки машин.

Ключевые слова: точность сборки, размерные цепи, метод регулирования, компенсатор, геометрическая прогрессия, схема компенсации.

CALCULATION OF THE THICKNESS OF COMPENSATORS – MEMBERS OF THE GEOMETRIC PROGRESSION, TAKING INTO ACCOUNT THE ERRORS OF ASSEMBLY WORK WHEN ACHIEVING THE ACCURACY OF MACHINE ASSEMBLY BY THE CONTROL METHOD

O. A. Medvedev, S. V. Savchuk

Abstract

The article discusses the method of rational determination of the thickness of fixed thin compensators used to achieve the accuracy of machine assembly by the control method. To reduce the cost of manufacturing expansion joints, it is advisable to subordinate the values of their thickness in a set per product to a geometric progression with a denominator of 2. This makes it possible to selectively add up the thickness of the compensator thicknesses to obtain the thickness of the set of compensators of any multiplicity in relation to the compensation stage. For an objective determination of the compensation stage, when using compensators – members of the geometric progression, a mathematical condition for achieving the accuracy of assembly was compiled, taking into account the influence of technological factors on the formation of the size of the compensator, and, consequently, on the closing link of the assembly design dimensional chain. In order to visualize the relationship between the limit values of the closing link, the constituent links and the compensator, rational schemes have been developed to compensate for the dispersion of the sum of the constituent links. The schemes take into account the possible variants of the influence of the total component link and the compensator on the closing link that occur in practice. On the basis of the condition for achieving the accuracy of the closing link, equations have been developed for calculating the compensation stage and the number of compensators in the set for one copy of the assembled product. To facilitate the use of the proposed method in production, the results of calculations of the compensation stage and the number of compensators for the most typical values of the parameters of the links of real dimensional chains are presented in the form of tables. The implementation of the proposed method makes it possible to increase the objectivity of determining the compensation stage, and to reduce the number of expansion joints in a set per product by 3–4 times compared to the number of thin expansion joints of the same thickness. It can be useful for process engineers involved in the design of machine assembly processes.

Keywords: assembly accuracy, dimensional chains, control method, compensator, geometric progression, compensation scheme.

Введение

Для обеспечения попадания значения замыкающего звена сборочной конструкторской размерной цепи в заданный интервал его допуска регулирование размера неподвижного компенсатора, с целью компенсации значительного суммарного отклонения других составляющих звеньев цепи, возможно только ступенчато [1, 3], путём выбора одного компенсатора определённого размера из заранее изготовленного комплекта или подбора определённого числа равно тонких компенсаторов и дальнейшей установки их в изделие при окончательной сборке. При установке компенсатора определённого размера возможно обеспечить попадание замыкающего звена в пределы его допуска только для тех экземпляров собираемого изде-

лия, у которых суммарное отклонение других составляющих звеньев (не считая компенсатора) находится в диапазоне, равном допуску замыкающего звена. Применив компенсатор с размером больше предыдущего на величину допуска замыкающего звена, возможно обеспечить попадание замыкающего звена в пределы его допуска для тех экземпляров собираемого изделия, у которых суммарное отклонение других составляющих звеньев находится в диапазоне такой же величины, примыкающему к первому диапазону и так далее.

Таким образом, при условии отсутствия погрешностей выбираемых размеров компенсатора, степень компенсации S (разность размеров соседних компенсаторов в комплекте) равна допуску замыкающего звена TA_{Δ} [2, 4, 11], а число ступеней компенсации равно отношению

суммарного диапазона рассеивания составляющих звеньев (кроме компенсатора) TA_{Σ} к допуску замыкающего звена. В действительности степень компенсации должна быть меньше из-за наличия погрешностей изготовления компенсаторов и погрешности определения требуемого размера компенсатора [8, 9, 19].

Для определения размера компенсатора, требуемого в конкретном экземпляре изделия, обычно выполняется предварительная сборка этого экземпляра без компенсатора [12, 14, 16]. При этом на место замыкающего звена устанавливается его эталон. Размер эталона равен наиболее предпочтительному среднему значению замыкающего звена. Затем измеряется полость, которую должен заполнить компенсатор, чтобы замыкающее звено было равно эталону, и из заранее изготовленного комплекта выбирается компенсатор с размером, ближайшим к измеренному, или требуемое количество равно тонких компенсаторов определяется делением найденного при измерении размера на размер одного компенсатора.

После частичной разборки экземпляра изделия эталон удаляется и выполняется окончательная сборка этого объекта с выбранным компенсатором.

Индивидуальным выбором компенсатора устраняется прямая зависимость замыкающего звена от остальных составляющих звеньев (кроме компенсатора), и отклонение замыкающего звена от его среднего значения будет равно отклонению размера выбранного компенсатора (или набора тонких компенсаторов) от размера полости, которая измерялась при предварительной сборке.

Если местоположение компенсатора недоступно для измерения, в отличие от местоположения замыкающего звена, то при предварительной сборке на место компенсатора устанавливается его эталон с размером K_s , измеряется полученное замыкающее звено $A_{\Delta u}$ и рассчитывается требуемый размер компенсатора с учетом требуемого среднего значения замыкающего звена $A_{\Delta c}$ по следующим формулам:

для уменьшающего компенсатора

$$\bar{K} = \bar{K}_s - (A_{\Delta c} - A_{\Delta u}); \quad (1)$$

для увеличивающего компенсатора

$$\bar{K} = \bar{K}_s + (A_{\Delta c} - A_{\Delta u}). \quad (2)$$

Применение метода регулирования для достижения высокой точности замыкающих звеньев линейных сборочных конструкторских размерных цепей, при большом числе неточных составляющих звеньев обычно приводит к необходимости заблаговременного изготовления комплектов компенсаторов для каждого экземпляра собираемого изделия, каждый из которых включает большое число компенсаторов [10].

Значительные затраты на изготовление компенсаторов вызывают необходимость принятия мер по уменьшению их требуемого количества. Одним из способов сокращения требуемого количества тонких компенсаторов в комплекте для каждого экземпляра собираемого изделия является подчинение значений их толщин геометрической прогрессии со знаменателем 2 [13, 17]. При этом толщина любого компенсатора в комплекте определяется по формуле [5]

$$K_i = 2^{i-1} \cdot C, \quad (3)$$

где i – порядковый номер компенсатора – члена геометрической прогрессии; C – величина ступени компенсации.

Следовательно, $K_1 = C$, $K_2 = 2C$, $K_3 = 4C$, $K_4 = 8C$, $K_5 = 16C$, $K_6 = 32C$, $K_7 = 64C$ и т. д.

Применение прогрессии, в которой каждый следующий член больше предыдущего в 2 раза, позволяет при выборочном сложении толщин компенсаторов получить суммарную толщину набора компенсаторов любой кратности по отношению к ступени компенсации, например: $K_{n1} = 3C = C + 2C$, $K_{n2} = 5C = 4C + C$, $K_{n3} = 6C = 4C + 2C$, $K_{n4} = 7C = 4C + 2C + C$, $K_{n5} = 9C = 8C + C$, $K_{n6} = 10C = 8C + 2C$, $K_{n7} = 11C = 8C + 2C + C$ и т. п. Эффективность такого способа сокращения количества компенсаторов наглядно демонстрирует последний пример, из которого следует, что при диапазоне рассеивания составляющих звеньев равном $11C$ для компенсации отклонения суммы составляющих звеньев в пределах последней одиннадцатой

ступени компенсации потребуется 11 одинаковых тонких компенсаторов или всего 3 компенсатора – члена геометрической прогрессии (из 4-х, необходимых в комплекте).

Несмотря на очевидную рациональность указанного подхода к сокращению числа тонких компенсаторов, он не получил широкого распространения в сборочном производстве. Это обусловлено отсутствием в специальной технической и учебной литературе [1, 2, 4, 11, 15, 18 и др.] приемлемых методик расчета рациональной величины компенсации C и минимально достаточного числа компенсаторов n в комплекте на одно изделие с учетом погрешностей сборочных работ и оснастки (эталонов, измерительных средств, компенсаторов и т. п.).

Постановка задач исследования

Для объективного определения ступени компенсации при использовании компенсаторов – членов геометрической прогрессии необходимо составить математически выраженное условие достижения точности сборки, учитывающее влияние всех технологических факторов на формирование размера компенсатора, а следовательно, на замыкающее звено сборочной конструкторской размерной цепи. Такое условие должно устанавливать взаимосвязь между заданным в технических условиях на сборку допуском замыкающего звена и погрешностями сборочных работ, выполняемых для определения толщины компенсатора.

Для наглядного представления взаимосвязи предельных значений замыкающего звена, составляющих звеньев и компенсатора необходимо разработать рациональные схемы компенсации диапазона рассеивания суммы составляющих звеньев, учитывающие возможные варианты сочетаний этих звеньев, встречающиеся на практике.

На основе условия достижения точности замыкающего звена разработать уравнения для расчета ступени компенсации числа компенсаторов в комплекте для одного экземпляра собираемого изделия.

Для облегчения использования предлагаемой методики определения числа компенсаторов и ступени компенсации на производстве следует представить результаты типовых расчетов для наиболее характерных значений параметров звеньев реальных размерных цепей в виде графиков или таблиц.

Анализ технологических сборочных размерных цепей и составление условия достижения точности сборки

Технологическая сборочная размерная цепь формируется на этапе предварительной сборки изделия (без компенсатора и с эталоном замыкающего звена на месте этого звена), а также при измерении полученной полости под компенсатор и составлении набора из нескольких компенсаторов, имеющих суммарный размер ближайший к измеренному [19]. Замыкающим звеном в ней является сформированный размер (толщина) компенсатора, а составляющими звеньями, кроме размеров штатных деталей изделия, также являются размеры используемой сборочной оснастки и погрешности выполнения сборочных работ.

При окончательной сборке изделия из комплектующих деталей и составленного компенсатора отклонение замыкающего звена конструкторской цепи от его эталона будет равно отклонению толщины составленного компенсатора от размера его местоположения.

Это отклонение складывается из отклонений тех звеньев технологической цепи, которые при предварительной сборке конкретного экземпляра изделия могут приобретать случайные значения, отличающиеся от их значений в конструкторской цепи (погрешность изготовления эталона среднего значения замыкающего звена ε_{Σ} , погрешность установки эталона $\varepsilon_{y_{\Sigma}}$, погрешность измерения местоположения компенсатора ε_u , погрешность изготовления компенсаторов ε_k , погрешность выбора компенсатора ε_{σ}). Погрешности таких звеньев могут быть компенсированы только за счет допуска замыкающего звена конструкторской цепи, а не подбором компенсатора. Так как при сборке большинства экземпляров изделий будут использоваться наборы из нескольких компенсаторов, каждый из которых может иметь погрешность ε_k , то возможная по-

грешность суммарной толщины отдельного набора из n компенсаторов будет быть равна произведению $n \cdot \varepsilon_k$.

Следовательно, условие достижения точности сборки, отражающее соотношение допуска замыкающего звена и суммы возникающих погрешностей, при котором замыкающее звено не будет выходить за пределы своего допуска, может быть выражено формулой (4)

$$TA_{\Delta} \geq \varepsilon_{\gamma} + \varepsilon_{\gamma\beta} + \varepsilon_u + \varepsilon_{\varepsilon} + n \cdot \varepsilon_k. \quad (4)$$

Анализ условий выбора толщины набора компенсаторов по результату измерения полости под компенсатор позволяет установить, что разница между указанными величинами, при соблюдении сборщиком технологической дисциплины, не может превышать ступень компенсации. Следовательно, формулу (4) можно использовать для определения величины компенсации во взаимосвязи с остальными погрешностями. Заменяя $\varepsilon_{\varepsilon}$ на ее максимально возможное значение, равное ступени компенсации C , и приравняв правую и левую части, выражение (4) преобразуем в равенство (5)

$$TA_{\Delta} = \varepsilon_{\gamma} + \varepsilon_{\gamma\beta} + \varepsilon_u + C + n \cdot \varepsilon_k. \quad (5)$$

Рекомендации по рациональному определению погрешностей ε_{γ} , $\varepsilon_{\gamma\beta}$, ε_u , ε_k приведены в [7, 8].

Однако использовать уравнение (5) для проектного расчета ступени компенсации невозможно, так как число компенсаторов n является функцией ступени компенсации, что затрудняет выделение C в отдельную часть равенства. Поэтому уравнение (5) можно использовать лишь для проверочных (уточняющих) расчетов. Методика проектного расчета ступени компенсации рассмотрена ниже.

Разработка рациональных схем компенсации диапазона рассеивания суммы составляющих звеньев

Основой предлагаемой методики определения толщин компенсаторов – членов геометрической прогрессии являются схемы компенсации суммарного диапазона рассеивания составляющих звеньев конструкторской сборочной размерной цепи, представляющие собой сочетание конструкторской и технологической сборочных размерных цепей.

Конструкторская цепь реальной машины представляется в схеме компенсации математически тождественной трехзвенной цепью, состоящей из суммарного составляющего звена A_{Σ} , компенсатора K и замыкающего звена A_{Δ} . Суммарное составляющее звено является алгебраической суммой всех реальных составляющих звеньев (кроме компенсатора), а его диапазон рассеивания TA_{Σ} равен арифметической сумме допусков составляющих звеньев (кроме допуска компенсатора). При этом все многообразие реальных конструкторских цепей (при условии, что размер компенсатора сопоставим с допуском замыкающего звена и не может охватывать суммарное составляющее и замыкающее звено) сводится к двум вариантам трехзвенных цепей: 1) цепь с уменьшающим компенсатором и увеличивающим суммарным составляющим звеном; 2) цепь с увеличивающим компенсатором и увеличивающим суммарным составляющим звеном. В схеме компенсации каждое звено трехзвенной цепи представлено его предельными размерами и интервалом допуска (или диапазоном рассеивания).

Технологическую размерную цепь представим в схеме компенсации ступенью компенсации и погрешностями, входящими в равенство (5), в соответствии с которым их сумма должны быть равна допуску замыкающего звена конструкторской цепи TA_{Δ} . При допущении о симметричном распределении суммарной погрешности, совмещаем середину ее поля рассеивания с серединой интервала допуска замыкающего звена конструкторской цепи. Для уменьшения числа элементов, представленных на схеме компенсации, сумма ε_{γ} , $\varepsilon_{\gamma\beta}$, ε_u обозначена как погрешность формирования размера компенсатора ε_{pk} .

С целью уменьшения требуемого числа компенсаторов в комплекте на одно изделие, целесообразно обеспечить частичное перекрытие TA_{Δ} и TA_{Σ} . В случае использования компенсаторов, толщина которых сопоставима с допуском замыкающего звена TA_{Δ} , это всегда можно сделать путем корректировки положения интервала допуска любого из составляющих звеньев конструктор-

ской цепи относительно его номинала. Такое перекрытие позволит без установки компенсатора за счет допуска замыкающего звена компенсировать часть суммарного диапазона рассеивания составляющих звеньев, примыкающую к одной из его границ и равную ступени компенсации.

Для того чтобы набор компенсаторов при любом их числе оставался либо уменьшающим, либо увеличивающим, надо середину TA_{Δ} совместить с серединой первой ступени компенсации. Схемы компенсации, соответствующие описанным рациональным требованиям, приведены на рисунках 1 и 2, для уменьшающего и увеличивающего компенсатора соответственно.

Определение ступени компенсации и требуемого числа компенсаторов в комплекте для одного экземпляра изделия

Для того чтобы использовать уравнение (5) для расчета ступени компенсации, необходимо установить зависимость между числом требуемых компенсаторов n и ступенью компенсации C .

Как видно из разработанных схем компенсации, при перекрытии допуском замыкающего звена TA_{Δ} первой ступени компенсации в пределах TA_{Σ} достаточно иметь такое число компенсаторов в наборе, при котором их суммарная толщина будет равна величине $TA_{\Sigma} - C$. Эту же суммарную толщину n компенсаторов можно выразить формулой для расчета суммы конечного числа n членов геометрической прогрессии с показателем 2 [20]:

$$\sum_{i=1}^n K_i = (2^n - 1) \cdot C. \quad (6)$$

Тогда справедливо равенство (7)

$$\sum_{i=1}^n K_i = (2^n - 1) \cdot C = TA_{\Sigma} - C. \quad (7)$$

Выполним преобразование уравнения (7) с выделением в левую часть равенства 2^n

$$2^n = TA_{\Sigma} / C = N, \quad (8)$$

где N – число требуемых ступеней компенсации.

После логарифмирования уравнения (8) получим уравнение (9) для расчета числа компенсаторов n на точность замыкающего звена TA_{Δ} и погрешностях сборочных работ:

$$n = \log_2 (TA_{\Sigma} / C) = \log_2 TA_{\Sigma} - \log_2 C. \quad (9)$$

Подставив (9) в уравнение (5), получим уравнение (10), которое можно использовать для расчета ступени компенсации при известных параметрах звеньев конструкторской размерной цепи (TA_{Δ} и TA_{Σ}) и погрешностях сборочных работ:

$$TA_{\Delta} = C + \varepsilon_{pk} + \varepsilon_k \cdot \log_2 TA_{\Sigma} - \varepsilon_k \cdot \log_2 C. \quad (10)$$

Таким образом, уравнение (10) учитывает худший случай влияния точности набора компенсаторов на точность замыкающего звена A_{Δ} , при котором набор состоит из наибольшего возможного числа компенсаторов.

Чтобы снизить трудоемкость определения рациональных параметров точности сборочных работ, при которых можно приступить к решению уравнения (10), установим взаимосвязь между ε_{pk} и C . Для достоверного определения суммарной толщины набора компенсаторов – членов геометрического ряда, которая будет наиболее близка к размеру их местоположения, сформированному при предварительной сборке, достаточно ограничить допустимое поле рассеивания этой толщины величиной ступени компенсации. Тогда определение допустимой погрешности формирования толщины набора компенсаторов ($\varepsilon_{pk} = \varepsilon_{\gamma} + \varepsilon_{\gamma\beta} + \varepsilon_u$) целесообразно проводить с учетом взаимосвязи между значениями ε_{pk} и C , которая аналогична взаимосвязи допуска контролируемого параметра и допустимой погрешности измерения, регламентированной ГОСТ 8.051-81 [18]. Из этой взаимосвязи следует, что для достоверного измерения и заключения о годности, погрешность измерения не должна превышать одной пятой части от допуска измеряемого размера, если он соответствует точности грубее 9 квалитета, и одной третьей части, если допуск размера соответствует более высокой точ-

ности. Обычно ступень компенсации имеет значение от нескольких сотых до нескольких десятых долей миллиметра, что при размере места под компенсатор в 3–5 раз больше ступени компенсации (то есть до 1 мм) и соответствует точности грубее 9 квалитета. Следовательно, исключить ошибочный выбор толщины набора компенсаторов, отличающейся от ширины местоположения этого набора измерения будет соответствовать условию

$$\varepsilon_{рк\ max} = 0,2 \cdot C. \quad (11)$$

При указанном условии достоверности измерений для расчетов ступени компенсации можно использовать уравнение

$$TA_{\Delta} \geq 1,2C + \varepsilon_k \cdot \log_2 TA_{\Sigma} - \varepsilon_k \cdot \log_2 C. \quad (12)$$

Уравнения (10) или (12) являются трансцендентными. Их невозможно решить аналитически для определения значения ступени компенсации. Их решение возможно численными методами с определенной точностью. Решение выполнялось методом дихотомии с помощью программы, разработанной в приложении Excel на языке Visual Basic for Application (VBA) [6]. Значения TA_{Σ} , $\varepsilon_{рк}$, ε_k корректировались так, чтобы n получалось целым.

Для упрощения использования предлагаемой методики определения ступени компенсации и числа компенсаторов на производстве, по результатам расчетов составлены таблицы зависимостей $n = f(TA_{\Sigma}, TA_{\Delta}, \varepsilon_k)$ и $C = f(TA_{\Sigma}, TA_{\Delta}, \varepsilon_k)$ для некоторых характерных для техпроцессов сборки машин значений TA_{Σ} , TA_{Δ} , ε_k , которые можно использовать для предварительного определения числа компенсаторов, ступени компенсации и погрешности сборочных работ по формированию толщины набора компенсаторов. Принятые табличные значения могут потребовать корректировки для обеспечения равенства (5).

При известной ступени компенсации размер K_i любого из n компенсаторов (при $1 \leq i \leq n$), независимо от схемы компенсации, может быть рассчитан по формуле (3).

Предельные значения компенсатора каждой ступени с учетом симметричного распределения погрешности его толщины ε_k относительно номинального (среднего) значения толщины следует определять по формулам (12)

$$\begin{aligned} K_{i\ min} &= K_i - \varepsilon_k/2; \\ K_{i\ max} &= K_i + \varepsilon_k/2. \end{aligned} \quad (12)$$

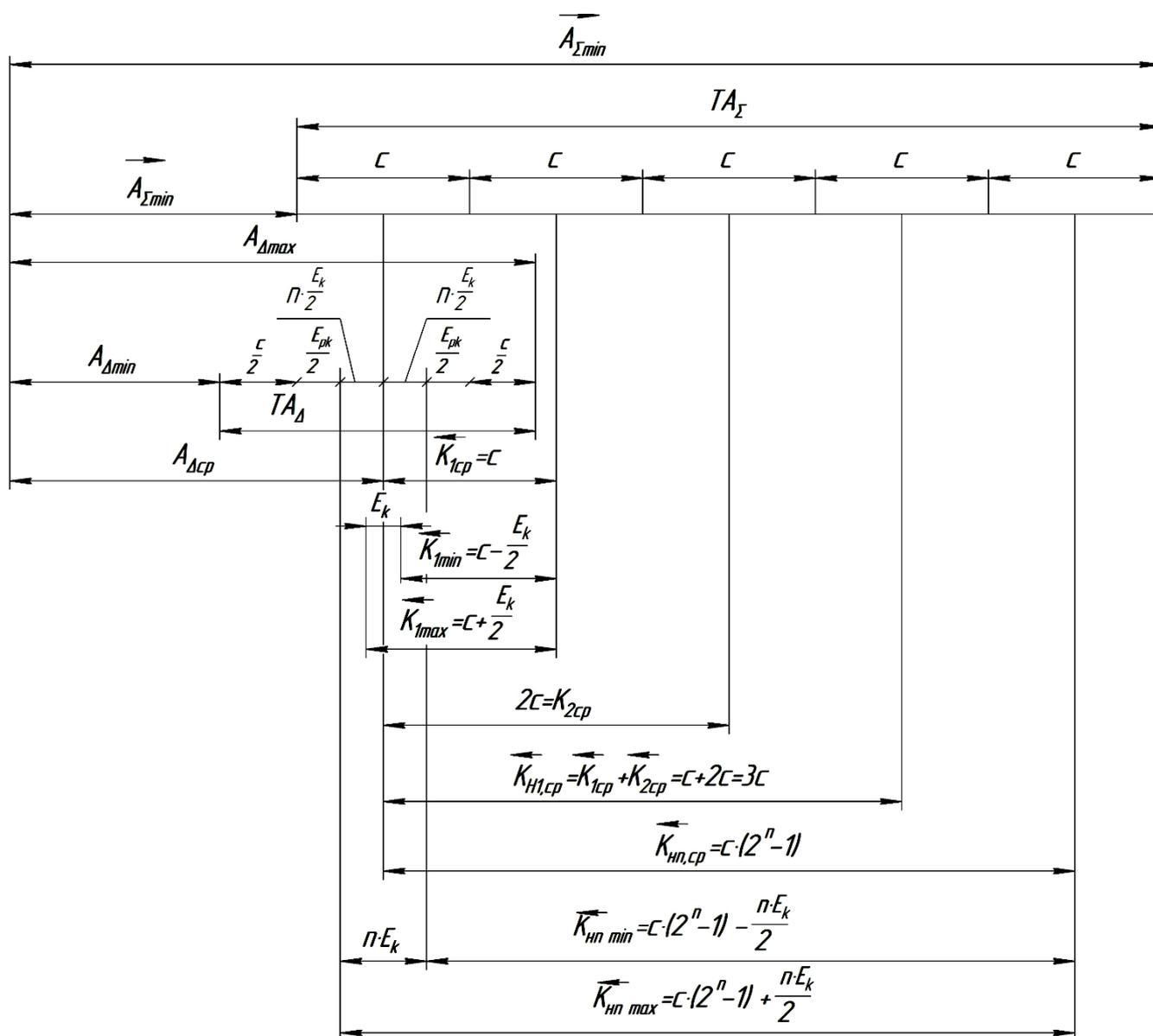


Рисунок 1 – Схема компенсации допусков составляющих звеньев регулированием комплектом неподвижных тонких уменьшающих компенсаторов – членов геометрической прогрессии

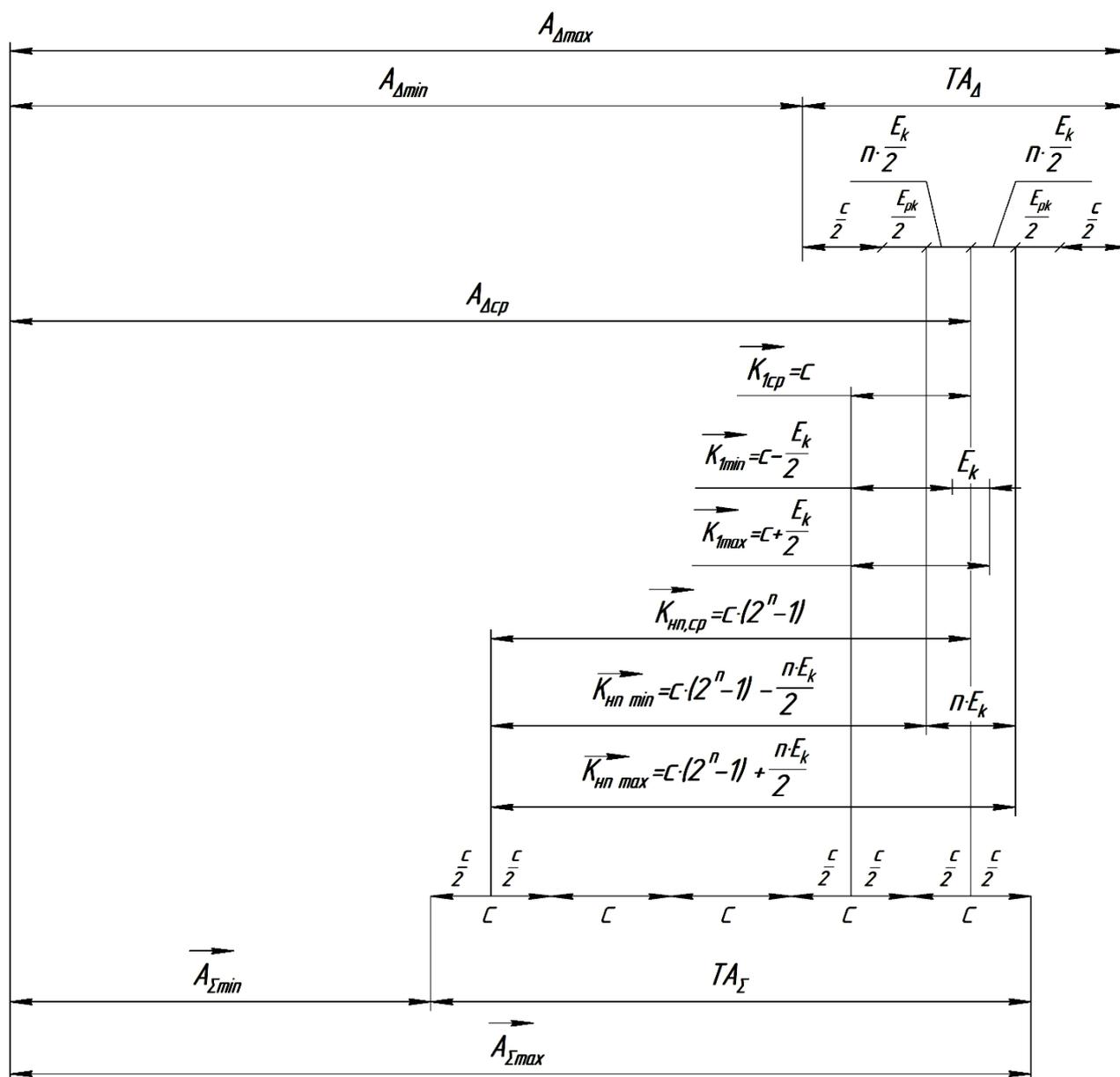


Рисунок 2 – Схема компенсации допусков составляющих звеньев регулированием комплектом неподвижных тонких увеличивающих компенсаторов – членов геометрической прогрессии

Таблица 1 – Требуемые значения n , C , $E_{рк}$ при $TA_{\Delta} = 0,05$ мм; $\epsilon_k = 0,006$ мм (по 6 качеству)

TA_{Σ} , мм	Св.0,04... 0,072	Св.0,072...0,124	Св.0,124...0,208	Св.0,208...0,32	Св.0,32...0,512	Св.0,512...0,704
n , шт	1	2	3	4	5	6
C , мм	0,036	0,031	0,026	0,02	0,016	0,011
$E_{рк}$, мм	0,007	0,006	0,005	0,004	0,003	0,002

Таблица 2 – Требуемые значения n , C , $E_{рк}$ при $TA_{\Delta} = 0,05$ мм; $\epsilon_k = 0,01$ мм (по 7 качеству)

TA_{Σ} , мм	Св.0,041... 0,066	Св.0,066...0,1	Св.0,1...0,128	Св.0,208...0,32
n , шт	1	2	3	4
C , мм	0,033	0,025	0,016	0,0083
$E_{рк}$, мм	0,006	0,005	0,003	0,0016

Таблица 3 – Требуемые значения n , C , $E_{рк}$ при $TA_{\Delta} = 0,1$ мм; $\epsilon_k = 0,01$ мм (по 7 качеству)

TA_{Σ} , мм	Св.0,083... 0,15	Св.0,15...0,264	Св.0,264...0,464	Св.0,464...0,8	Св.0,8...1,28
n , шт	1	2	3	4	5
C , мм	0,075	0,066	0,058	0,05	0,04
$E_{рк}$, мм	0,015	0,013	0,011	0,01	0,004

Таблица 4 – Требуемые значения n , C , $\epsilon_{рж}$ при $TA_{д} = 0,1$ мм; $\epsilon_{к} = 0,025$ мм (по 9 квалитету)

TA_{Σ} , мм	Св.0,083... 0,125	Св.0,125...0,1666
n , шт	1	2
C , мм	0,0625	0,0416
$\epsilon_{рж}$, мм	0,012	0,008

Таблица 5 – Требуемые значения n , C , $\epsilon_{рж}$ при $TA_{д} = 0,2$ мм; $\epsilon_{к} = 0,01$ мм (по 7 квалитету)

TA_{Σ} , мм	Св.0,16... 0,316	Св.0,316... 0,6	Св.0,6... 1,12	Св.1,12...2,08
n , шт	1	2	3	4
C , мм	0,158	0,15	0,14	0,13
$\epsilon_{рж}$, мм	0,031	0,03	0,028	0,026

Таблица 6 – Требуемые значения n , C , $\epsilon_{рж}$ при $TA_{д} = 0,2$ мм; $\epsilon_{к} = 0,014$ мм (по 8 квалитету)

TA_{Σ} , мм	Св.0,166...0,31	Св.0,31...0,56	Св.0,56...1,04	Св.1,04...1,92	Св.1,92...3,456	Св.3,456...6,184
n , шт	1	2	3	4	5	6
C , мм	0,155	0,14	0,13	0,12	0,108	0,0966
$\epsilon_{рж}$, мм	0,031	0,028	0,026	0,024	0,021	0,019

Таблица 7 – Требуемые значения n , C , $\epsilon_{рж}$ при $TA_{д} = 0,2$ мм; $\epsilon_{к} = 0,025$ мм (по 9 квалитету)

TA_{Σ} , мм	Св.0,166... 0,29	Св.0,29...0,5	Св.0,5...0,832	Св.832...1,328	Св.1,328...1,984	Св.1,984...2,624
n , шт	1	2	3	4	5	6
C , мм	0,145	0,125	0,104	0,083	0,062	0,041
$\epsilon_{рж}$, мм	0,029	0,02	0,018	0,016	0,012	0,008

Таблица 8 – Требуемые значения n , C , $\epsilon_{рж}$ при $TA_{д} = 0,3$ мм; $\epsilon_{к} = 0,014$ мм (по 8 квалитету)

TA_{Σ} , мм	Св.0,25... 0,472	Св.0,476...0,9	Св.0,9...1,72	Св.1,72...3,248	Св.3,248...6,112
n , шт	1	2	3	4	5
C , мм	0,238	0,226	0,215	0,203	0,191
$\epsilon_{рж}$, мм	0,047	0,045	0,043	0,04	0,038

Таблица 9 – Требуемые значения n , C , $\epsilon_{рж}$ при $TA_{д} = 0,4$ мм; $\epsilon_{к} = 0,01$ мм (по 7 квалитету)

TA_{Σ} , мм	Св.0,333...0,65	Св.0,65...1,24	Св.1,24...2,46	Св.2,46...4,8	Св.4,8...9,312
n , шт	1	2	3	4	5
C , мм	0,325	0,31	0,308	0,3	0,291
$\epsilon_{рж}$, мм	0,065	0,062	0,061	0,06	0,058

Заключение

Реализация предлагаемой методики взаимосвязанного определения параметров точности сборочных работ и компенсаторов – членов геометрической прогрессии при достижении точности сборки методом регулирования позволяет повысить объективность определения степени компенсации, минимально достаточного числа тонких неподвижных компенсаторов в комплекте для каждого экземпляра собираемых изделий.

Она может быть полезна инженерам-технологам, занимающимся проектированием технологических процессов сборки машин.

Список цитированных источников

- Расчет точности машин и приборов / В. П. Булатов, И. Г. Фридлендер, А. Б. Баталов [и др.] ; под общ. ред. В. П. Булатова, И. Г. Фридлендера. – СПб. : Политехника, 1993. – 495 с.
- Замятин, В. К. Технология и оснащение сборочного производства машино – приборостроения : справочник / В. К. Замятин. – М. : Машиностроение, 1995. – 608 с.
- Клименков, С. С. Нормирование точности изделий : учебное пособие / С. С. Клименков, А. Н. Голубев. – Витебск : ВГТУ, 2020. – 250 с.
- Ковшов, А. Н. Технология машиностроения : учебник / А. Н. Ковшов. – СПб. : Лань, 2021. – 320 с.
- Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1984.
- Ларсен, Р. У. Инженерные расчеты в Microsoft Office Excel / Р. У. Ларсен. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2004. – 544 с.
- Медведев, О. А. Оптимизация допусков неподвижных компенсаторов разной толщины для достижения точности сборки машин методом регулирования / О. А. Медведев, С. В. Савчук, Б. С. Дарчич // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 1 (133). – С. 125–129.
- Медведев, О. А. Выбор технологической оснастки для достижения точности сборки методом регулирования неподвижных компенсаторов / О. А. Медведев, П. Н. Ковальчук // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Машиностроение, автоматизация, ЭВМ. – 2008. – № 4 (52). – С. 40–44.
- Медведев, О. А. Теоретико-вероятностный расчет сборочных размерных цепей машин, содержащих тонкие компенсаторы / О. А. Медведев, Ю. В. Рожков // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Машиностроение. – 2011. – № 4 (70). – С. 50–54.
- Медведев, О. А. Теоретико-вероятностный расчет числа тонких равных компенсаторов при достижении точности сборки методом регулирования / О. А. Медведев // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2022. – № 2 (128). – С. 87–91.
- Никифоров, А. Д. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения : учебное пособие для вузов / А. Д. Никифоров. – 4-ое изд. – М. : Высшая школа, 2007. – 295 с.
- Беляков, Н. В. Основы технологии машиностроения. Проектирование технологических процессов: учеб. пособие / Н. В. Беляков, В. А. Горохов, Е. И. Махаринский. – Старый Оскол : Изд-во «Тонкие наукоемкие технологии», 2010. – 767 с.
- Палей, М. А. Допуски и посадки : справочник : в 2 ч. / М. А. Палей, А. Б. Романов, В. А. Брагинский. – 8-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 2001. – Ч. 2. – 608 с.
- Проектирование технологических процессов в машиностроении : учебное пособие для вузов / И. П. Филонов, Г. Я. Беляев, Л. М. Кожуро [и др.] ; под общ. ред. И. П. Филонова. – Минск : УП «Технопринт», 2003. – 910 с.

15. Жолобов, А. А. Проектирование технологических процессов сборки машин : учебник / А. А. Жолобов, В. А. Лукашенко. – Минск : Новое знание, 2005. – 410 с.
16. Размерный анализ конструкций : справочник / С. Г. Бондаренко, О. Н. Чередников, В. П. Губий, Т. М. Игнатцев ; под общ. ред. С. Г. Бондаренко. – К. : Техника, 1989. – 150 с.
17. Солонин, И. С. Расчет сборочных и технологических размерных цепей / И. С. Солонин, С. И. Солонин. – М. : Машиностроение, 1980. – 110 с.
18. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / В. Н. Андреев, А. Н. Афонин, В. Ф. Безъязычный [и др.] ; под ред. А. С. Васильева, А. А. Кутина. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Инновационное машиностроение, 2018. – Т. 2. – 818 с.
19. Технология машиностроения (специальная часть) : учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. А. Гусев, Е. Р. Ковальчук, И. М. Колесов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1986. – 480 с.
20. Цыпкин, А. Г. Математические формулы. Алгебра. Геометрия. Математический анализ : справочник / А. Г. Цыпкин, Г. Г. Цыпкин. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1985. – 128 с.
9. Medvedev, O. A. Teoretiko-veroyatnostnyj raschet sborochnyh razmeryh cepej mashin, soderzhashchih tonkie kompensatory / O. A. Medvedev, YU. V. Rozhkov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie. – 2011. – № 4 (70). – S. 50–54.
10. Medvedev, O. A. Teoretiko-veroyatnostnyj raschet chisla tonkih ravnyh kompensatorov pri dostizhenii tochnosti sborki metodom regulirovaniya / O. A. Medvedev // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2022. – № 2 (128). – S. 87–91.
11. Nikiforov, A. D. Vzaimozamenyaemost', standartizaciya i tekhnicheskie izmereniya : uchebnoe posobie dlya vuzov / A. D. Nikiforov. – 4-oe izd. – M. : Vysshaya shkola, 2007. – 295 s.
12. Belyakov, N. V. Osnovy tekhnologii mashinostroeniya. Proektirovanie tekhnologicheskikh processov: ucheb. posobie / N. V. Belyakov, V. A. Gorohov, E. I. Maharinskij. – Staryj Oskol : Izd-vo «Tonkie naukoemkie tekhnologii», 2010. – 767 s.
13. Palej, M. A. Dopuski i posadki : spravochnik : v 2 ch. / M. A. Palej, A. B. Romanov, V. A. Braginskij. – 8-e izd., pererab. i dop. – SPb. : Politehnika, 2001. – CH. 2. – 608 s.
14. Proektirovanie tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii : uchebnoe posobie dlya vuzov / I. P. Filonov, G. YA. Belyaev, L. M. Kozhuro [i dr.]; pod obshch. red. I. P. Filonova. – Minsk : UP «Tekhnoprint», 2003. – 910 s.
15. ZHolobov, A. A. Proektirovanie tekhnologicheskikh processov sborki mashin : uchebnik / A. A. ZHolobov, V. A. Lukashenko. – Minsk : Novoe znanie, 2005. – 410 s.
16. Razmernyj analiz konstrukcij : spravochnik / S. G. Bondarenko, O. N. Cherednikov, V. P. Gubij, T. M. Ignatcev ; pod obshch. red. S. G. Bondarenko. – K. : Tekhnika, 1989. – 150 s.
17. Solonin, I. S. Raschet sborochnyh i tekhnologicheskikh razmeryh cepej / I. S. Solonin, S. I. Solonin. – M. : Mashinostroenie, 1980. – 110 s.
18. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya : v 2 t. / V. N. Andreev, A. N. Afonin, V. F. Bez'yazychnyj [i dr.]; pod red. A. S. Vasil'eva, A. A. Kutina. – 6-e izd., pererab. i dop. – M. : Innovacionnoe mashinostroenie, 2018. – Т. 2. – 818 s.
19. Tekhnologiya mashinostroeniya (special'naya chast') : uchebnik dlya mashinostroitel'nyh special'nostej vuzov / A. A. Gusev, E. R. Koval'chuk, I. M. Kolesov [i dr.]. – M. : Mashinostroenie, 1986. – 480 s.
20. Cypkin, A. G. Matematicheskie formuly. Algebra. Geometriya. Matematicheskij analiz : spravochnik / A. G. Cypkin, G. G. Cypkin. – M. : Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit-ry, 1985. – 128 s.

Материал поступил 27.02.2025, одобрен 01.03.2025, принят к публикации 12.03.2025