

ОПТИМИЗАЦИЯ ДОПУСКОВ НЕПОДВИЖНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ РАЗНОЙ ТОЛЩИНЫ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ТОЧНОСТИ СБОРКИ МАШИН МЕТОДОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

О. А. Медведев¹, С. В. Савчук², Б. С. Дарчич³

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 кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: sergeyskb@tut.by

³ Студент четвертого курса УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: bodj1234567@gmail.com

Реферат

В статье рассматривается методика определения оптимальных значений допусков компенсаторов разной толщины, используемых для достижения точности замыкающих звеньев линейных сборочных размерных цепей машин методом регулирования. Критерием оптимизации является себестоимость обработки плоских поверхностей комплекта компенсаторов, необходимого для одного экземпляра изделия. Методика позволяет повысить объективность определения величины и степени компенсации, числа неподвижных компенсаторов, допусков компенсаторов во взаимосвязи с параметрами точности сборочных работ. Методика может быть полезна инженерам, разрабатывающим техпроцессы сборки машин.

Ключевые слова: сборка, точность, компенсатор, метод регулирования, методика, оптимизация.

OPTIMISATION OF TOLERANCES OF FIXED EXPANSION JOINTS OF DIFFERENT THICKNESSES FOR PRECISE MACHINE ASSEMBLY BY THE CONTROL METHOD

O. A. Medvedev, S. V. Savchuk, B. S. Darchich

Abstract

The article discusses the method for determining the optimal tolerances of expansion joints of different thicknesses used to achieve the accuracy of the closing links of linear assembly dimensional chains of machines by the control method. The optimization criterion is the cost of processing flat surfaces of a set of expansion joints required for one piece of product. The method makes it possible to increase the objectivity of determining the value and stage of compensation, the number of fixed expansion joints, and the tolerances of expansion joints in relation to the parameters of the accuracy of assembly work. The methodology can be useful for engineers who develop technological processes for assembling machines.

Keywords: assembly, accuracy, compensator, control method, methodology, optimization.

Введение

Метод ступенчатого изменения (регулирования) размера одного из составляющих звеньев (компенсатора) широко используется для достижения высокой точности замыкающих звеньев длинных конструкторских сборочных размерных цепей машин в серийном и массовом производстве. Обычно компенсаторами являются кольца или втулки небольшой толщины. До сборки для каждого экземпляра собираемых узлов приходится изготавливать комплект компенсаторов, в котором толщины соседних компенсаторов отличаются на величину ступени компенсации. В собираемом экземпляре узла используется лишь один компенсатор, толщина которого, в большинстве случаев, находится измерением места под компенсатор, полученного при предварительной сборке узла без компенсатора, когда на место замыкающего звена устанавливается его эталон. Если толщина выбранного компенсатора равна размеру измеренного места, то после окончательной сборки узла с таким компенсатором замыкающее звено будет равно размеру эталона. В противном случае отклонение компенсатора от размера указанного места приведет к такому же по величине отклонению замыкающего звена от эталона. Следовательно, вместо зависимости точности замыкающего звена от точности всех составляющих звеньев конструкторской размерной цепи возникает зависимость точности замыкающего звена только от точности компенсатора.

Такой подход к анализу точности сборки позволяет в значительной мере устранить недостатки, свойственные традиционным методикам расчета сборочных размерных цепей, используемых при достижении точности сборки методом регулирования [1, 2 и др.]: 1) в условии достижения точности сборки не учитываются погрешно-

сти формирования размера компенсатора; 2) степень компенсации определяется без учета погрешностей сборочных работ и оснастки; 3) в величину компенсации, кроме допусков составляющих звеньев сборочной конструкторской размерной цепи, включается допуск компенсатора и погрешности сборочных работ [1, 2, 3], несмотря на то, что выбираемый компенсатор не может компенсировать погрешности, влияющие на формирование его размера.

Постановка задач исследования

Для объективного определения допустимых и оптимальных значений погрешностей сборочных работ и сборочной оснастки необходимо составить объективное математически выраженное условие достижения точности сборки на основе тщательного анализа факторов, возникающих в процессе предварительной сборки изделия, выбора компенсатора и при окончательной сборке. Такое условие должно устанавливать взаимосвязь между заданным в технических условиях на сборку допуском замыкающего звена и погрешностями сборочных работ.

Для практического использования такого условия для оценки приемлемости разработанной технологии сборки и принятой сборочной оснастки необходимо разработать методику определения допустимых рациональных значений отдельных погрешностей, влияющих на точность сборки.

Поскольку погрешностью изготовления компенсатора можно управлять, применяя разные методы и стадии их обработки, необходимо разработать методику определения оптимального значения допустимой погрешности компенсатора по критерию минимума затрат на изготовление комплекта компенсаторов на каждый экземпляр изделия.

Величина компенсации и условие достижения точности замыкающего звена сборочной конструкторской размерной цепи

Для определения погрешности толщины выбираемого компенсатора следует выявить и решить технологическую сборочную размерную цепь, которая формируется на этапе предварительной сборки узла и измерения в нем размера полости под компенсатор. Замыкающим звеном в такой цепи является толщина выбранного компенсатора, а составляющими звеньями, кроме размеров штатных деталей узла, также являются размеры используемой сборочной оснастки (этalon замыкающего звена) и погрешности выполнения сборочных работ и изготовления компенсаторов, входящих в комплект на один узел.

В пределах партии собираемых узлов поле рассеяния толщины компенсатора, как замыкающего звена, будет равно сумме полей рассеяния всех составляющих звеньев технологической размерной цепи. Целенаправленным, индивидуальным для отдельного экземпляра собираемого узла, изменением толщины компенсатора возможно компенсировать только отклонения той части составляющих звеньев этой цепи, которые имеют стабильные значения для этого экземпляра, то есть отклонения звеньев (в пределах их допусков TA_j), являющихся размерами штатных деталей узла. Без изменения толщины компенсатора суммарное отклонение таких составляющих звеньев полностью вошло бы в отклонение замыкающего звена A_A конструкторской сборочной размерной цепи.

Остальные составляющие звенья технологической цепи могут приобретать случайные значения при сборке конкретного экземпляра узла. Их невозможно предсказать и компенсировать изменением толщины компенсатора, зависящей от их значений. Отклонения этих звеньев неизбежно будут определять отклонение толщины выбранного компенсатора от размера полости под компенсатор и, следовательно, отклонение замыкающего звена A_A от эталона при окончательной сборке узла с выбранным компенсатором. К таким звеньям относятся: погрешность изготовления эталона замыкающего звена δ_z , погрешность установки эталона δ_{uz} , погрешность измерения места под компенсатор δ_u , погрешность изготовления выбираемого компенсатора δ_k , погрешность выбора компенсатора δ_e (отклонение номинальной толщины выбранного компенсатора от результата измерения места под компенсатор).

Проведенный анализ влияния элементов технологической сборочной размерной цепи на толщину выбранного компенсатора и на погрешность замыкающего звена сборочной конструкторской цепи позволяет составить выражение для рационального определения величины компенсации за счет ступенчатого изменения толщины компенсатора и условия достижения точности сборки при методе регулирования неподвижными компенсаторами разной толщины.

Величина компенсации V представляет собой диапазон целенаправленного изменения толщины компенсатора. Максимальная толщина компенсатора потребуется в случае, когда в технологической сборочной размерной цепи увеличивающие составляющие звенья, являющиеся размерами штатных деталей узла, приобретут максимальные предельные значения в пределах их допусков, а аналогичные уменьшающие звенья – минимальные значения. Соответственно, минимальная толщина компенсатора потребуется в случае, когда увеличивающие составляющие звенья приобретут минимальные предельные значения, а уменьшающие звенья – максимальные предельные значения. Разность между максимальной и минимальной толщиной, являющаяся величиной компенсации, можно определить как сумму m допусков составляющих звеньев технологической цепи, принадлежащих размерам деталей, участвующих в предварительной сборке узла

$$V = \sum_{j=1}^m \delta_j \quad (1)$$

С учетом проведенного анализа технологической цепи условие достижения точности сборки должно отражать соотношение допуска замыкающего звена TA_A конструкторской цепи и суммы погрешностей, вызывающих отклонение размера места под компенсатор от толщины выбранного компенсатора (в пределах использования одного компенсатора из комплекта

$$TA_A \geq \delta_z + \delta_{uz} + \delta_u + \delta_k + \delta_e \quad (2)$$

Таким образом, при высокой точности сборочной оснастки, измерительных средств и компенсаторов можно обеспечить высокую точность сборки при невысокой точности составляющих звеньев конструкторской размерной цепи (кроме компенсатора).

Определение ступени компенсации и числа ступеней компенсации

Важным параметром полученного условия достижения точности является погрешность выбора компенсатора нужной толщины из заранее изготовленного комплекта компенсаторов, в котором толщины соседних компенсаторов отличаются на величину ступени компенсации. Анализ условий выбора компенсатора позволяет сделать вывод, что при соблюдении технологического регламента эта погрешность не может превышать ступень компенсации. Поэтому ступень компенсации S , как максимальную величину погрешности выбора толщины компенсатора, при которой условие достижения точности сборки (2) превращается в равенство, следует определять по формуле

$$S = TA_A - \delta_z - \delta_{uz} - \delta_u - \delta_k \quad (3)$$

Число ступеней компенсации N (число компенсаторов в комплекте) определяется делением величины компенсации на ступень компенсации

$$N = \frac{V}{TA_A - \delta_z - \delta_{uz} - \delta_u - \delta_k} \quad (4)$$

Определение рациональных значений погрешностей сборочных работ и оснастки

Полученное условие достижения точности замыкающего звена A_A и выражение для расчета числа ступеней компенсации можно использовать для определения рациональных значений погрешностей сборочной оснастки (материального эталона замыкающего звена и измерительного средства), погрешностей установки эталона и изготовления компенсатора. Как следует из выражения (4), уменьшение указанных погрешностей до минимально возможных значений при прочих равных условиях приведет к уменьшению числа компенсаторов в комплекте и, возможно, к снижению затрат на изготовление комплекта компенсаторов. Однако малые значения погрешностей возможны при использовании более дорогой сборочной оснастки и дорогостоящей технологии изготовления точных компенсаторов, что может привести к повышению общих затрат на достижение требуемой точности.

При выборе средства измерения размера места под компенсатор целесообразно учитывать взаимосвязь между значениями δ_u и s , которая аналогична взаимосвязи допустимой погрешности измерения и допуска контролируемого параметра. В соответствии с рекомендациями [4] и ГОСТ 8.051-81 для достоверного измерения и заключения о годности, погрешность измерения не должна превышать одной пятой части от допуска контролируемого параметра, если он соответствует точности грубее 9 качества, и одной третьей части, если он относится к более точным качествам. Обычно ступень компенсации имеет значение от нескольких сотых до нескольких десятых долей миллиметра, что при размере места под компенсатор 3...5 мм соответствует точности грубее 9 качества. Следовательно, исключить ошибочный выбор компенсатора, отличающегося от размера места под компенсатор более чем на одну ступень компенсации S , можно, если погрешность измерения будет соответствовать условию

$$\delta_u \leq 0,2 \cdot S \quad (5)$$

Погрешность размера эталона замыкающего звена A_A может быть принята равной допуску этого размера. Так как количество требуемых эталонов замыкающего звена A_A для изделия определенной конструкции невелико, то его без существенных затрат можно изготовить с максимально возможной на данном предприятии точностью (обычно с точностью размера по 6...7 качествам).

Погрешность установки эталона δ_{y_3} следует рассчитывать на основе геометрических схем его возможных перекосов в собираемом изделии. При исключении возможности перекосов эталона погрешность его установки может быть принята равной большему из двух параметров: либо погрешности формы установочной поверхности эталона; либо параметру R_z шероховатости установочной поверхности эталона.

После преобразований формулы (4) с учетом взаимосвязи (5) получим

$$N = \frac{V}{0,83(TA_{\Delta} - \delta_y - \delta_{y_3} - \delta_k)} \quad (6)$$

Учитывая то, что с ростом δ_k первый множитель в выражении (7) уменьшается, а второй увеличивается, можно предположить, что график функции (7) близок к параболическому с минимальным значением в пределах реального диапазона изменения δ_k (от допуска 6 до допуска 14 квалитета). Так как толщина компенсатора должна иметь стандартный допуск, соответствующий одному из указанных квалитетов, то функция C , определяемая формулой (7), будет иметь дискретный характер. Оптимальным значением допуска толщин компенсаторов по критерию минимальной себестоимости комплекта компенсаторов на один экземпляр изделия будет то значение, при котором функция (7) приобретает минимальное значение.

Наиболее трудоемкой частью решения задачи оптимизации допусков толщин компенсаторов является установление взаимосвязи между затратами на изготовление одного компенсатора и допуском его толщины $c = f(\delta_k)$. Из-за большого количества факторов, влияющих на себестоимость компенсаторов, выразить такую зависимость одной аналитической формулой весьма затруднительно. Намного проще можно определять дискретные значения этой функции для ограниченного числа квалитетов на основе расчета численных показателей типовой технологии мехобработки (припуски на технологические переходы, режимы резания, основное время) для компенсаторов типа колец (или втулок). Например, широко используемые компенсаторы типа колец, отличающиеся друг от друга диаметром наружного цилиндра в диапазоне от 10 до 150 мм и толщиной в диапазоне от 0,5 до 10 мм при точности толщины в диапазоне от 6 до 14 квалитета, можно в условиях серийного производства обрабатывать по единой типовой технологии при использовании станков ЧПУ. При этом для достижения разных квалитетов точности толщин компенсаторов, мехобработка плоских торцов должна состоять из разного количества технологических переходов, что и будет являться основной причиной различия себестоимостей компенсаторов с разной точностью толщин, при прочих равных характеристиках. Затраты на обработку других конструктивных элементов компенсатора не зависят от точности его толщины и их можно не учитывать при составлении функции (7). Таким образом, для сокращения числа технологических факторов, учитываемых при оптимизации допусков толщин компенсаторов, можно ограничиться расчетом только тех составляющих себестоимости компенсаторов, которые в наибольшей степени зависят от этих допусков. К таким составляющим относится стоимость заготовки компенсатора (так как масса заготовки зависит от величины припусков, удаляемых при выполнении технологических переходов мехобработки плоских торцов компенсаторов, вид и число которых зависит от точности толщины компенсатора) и себестоимость переходов мехобработки плоских торцов.

В качестве наиболее дешевых типовых заготовок для стальных компенсаторов в виде колец приняты пластины, отрезанные от круглого горячекатаного проката (ГОСТ 2590-2006).

Оптимизация допусков компенсаторов

Наиболее существенное влияние на затраты на достижение точности сборки методом регулирования имеет значение погрешности изготовления компенсаторов (их технологический допуск). Наиболее точными элементами компенсатора в виде втулки или кольца являются его плоские торцы, размер между которыми входит в конструкторскую сборочную размерную цепь. Основную долю в себестоимости компенсатора составляют затраты на обработку этих торцов. Величина затрат увеличивается с уменьшением допустимой погрешности толщины компенсатора δ_k . Затраты на изготовление комплекта компенсаторов для одного экземпляра собираемого узла можно выразить произведением затрат на один компенсатор (в виде функциональной зависимости затрат $c = f(\delta_k)$ от допустимой погрешности изготовления компенсаторов) на число компенсаторов в комплекте N , определяемое по формуле (6). Таким образом, затраты на изготовление комплекта компенсаторов можно определить по формуле (7)

$$C_N = f(\delta_k) \cdot N = f(\delta_k) \cdot \frac{V}{0,83(TA_{\Delta} - \delta_y - \delta_{y_3} - \delta_k)} \quad (7)$$

При разработке типовой технологии мехобработки плоских торцов компенсаторов в виде колец, с размерами в указанных ранее диапазонах, для условий серийного производства выбраны методы обработки торцов и стадии исполнения этих методов, технологические базы, типовой маршрут мехобработки, металлорежущее оборудование с ЧПУ и технологическая оснастка, определены припуски на возможные переходы мехобработки расчетно-аналитическим методом, определены режимы резания и затраты времени для возможных переходов мехобработки, определены затраты на заготовки и на возможные переходы мехобработки.

Для среднесерийного производства в качестве наиболее предпочтительного метода мехобработки плоскостей на черновой, получистовой стадии техпроцесса (по сочетанию таких факторов, как высокая производительность и универсальность и невысокая себестоимость обработки) принято фрезерование торцовыми фрезами. В качестве метода обработки высокоточных компенсаторов принято плоское шлифование на станках с прямоугольным столом.

Стадии исполнения указанных методов обработки одного плоского торца принимались с учетом таблиц точности мехобработки [4], в зависимости от точности толщины компенсатора: для получения толщин компенсаторов с точностью 13 или 14 квалитета – черновое (однократное) фрезерование; для получения толщин компенсаторов с точностью 11 или 12 квалитета – черновое и получистовое фрезерование (2 технологических перехода); для получения толщин компенсаторов с точностью 9 или 10 квалитета – черновое, получистовое и чистовое фрезерование (3 перехода); для получения толщин компенсаторов с точностью 8 квалитета – черновое, получистовое, чистовое фрезерование и предварительное шлифование (4 перехода); для получения толщин компенсаторов с точностью 7 квалитета – черновое, получистовое, чистовое фрезерование, предварительное и чистовое шлифование (5 переходов); для получения толщин компенсаторов с точностью 6 квалитета – черновое, получистовое, чистовое фрезерование, предварительное, чистовое и тонкое шлифование (6 переходов).

В качестве приспособления для установки полуфабрикатов компенсаторов при обработке на вертикально-фрезерном и плоскошлифовальном станках принята стандартная магнитная плита.

Для определения припусков, режимов резания, основного и штучно-калькуляционного времени для указанных переходов использовались традиционные для технологии машиностроения зависимости и нормативы, приведенные в [4, 5].

В ходе предварительных расчетов масс заготовок компенсаторов с одинаковыми размерами, но разной точностью толщины, установлено, что из-за малой величины припусков, удаляемых при получистовых и чистовых переходах, массы заготовок для компенсаторов разной точности отличаются на несколько грамм и стоимость их заготовок практически одинакова. Это позволяет не учитывать стоимость заготовок как малозначительный фактор, при оптимизации допусков толщин компенсаторов.

Затраты $c = f(\delta_k)$ на выполнение P переходов (при P от 1 до 6), требуемых для достижения определенной точности, определялись суммированием затрат на отдельные переходы c_i . (c_1 – для чернового фрезерования, c_2 – для получистового фрезерования, c_3 – для чистового фрезерования, c_4 – для предварительного шлифования, c_5 – для чистового шлифования, c_6 – для тонкого шлифования)

$$c = f(\delta_k) = \sum_{i=1}^P c_i. \quad (8)$$

Каждое слагаемое c_i определялось как произведение затрат на одну минуту работы оборудования, принятого для выполнения i -й стадии обработки компенсатора [5], на штучно-калькуляционное время однопереходной операции в минутах.

Для автоматизации расчета численных показателей типовой технологии мехобработки торцов компенсаторов и себестоимости комплекта компенсаторов разработана компьютерная программа с использованием табличного редактора Excel.

Апробация предлагаемой методики проведена на примере оптимизации допусков компенсатора, в виде шайбы (звено A_6), для регулировки полости под пружину форсунки ЯЗДА 273-20 закрытого типа с многодырчатый распылителем и гидравлически управляемой иглой, схема которой представлена на рисунке 1.

Результаты расчетов себестоимости обработки плоских торцов компенсатора при разных качествах точности толщины представлены на рисунке 2.

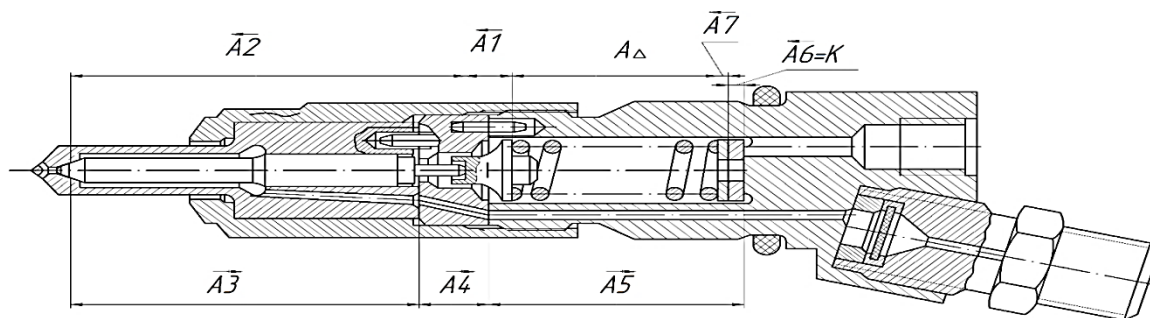


Рисунок 1 – Схема конструкции форсунки ЯЗДА 273-20 и схема размерной цепи с компенсатором (звено A_6)

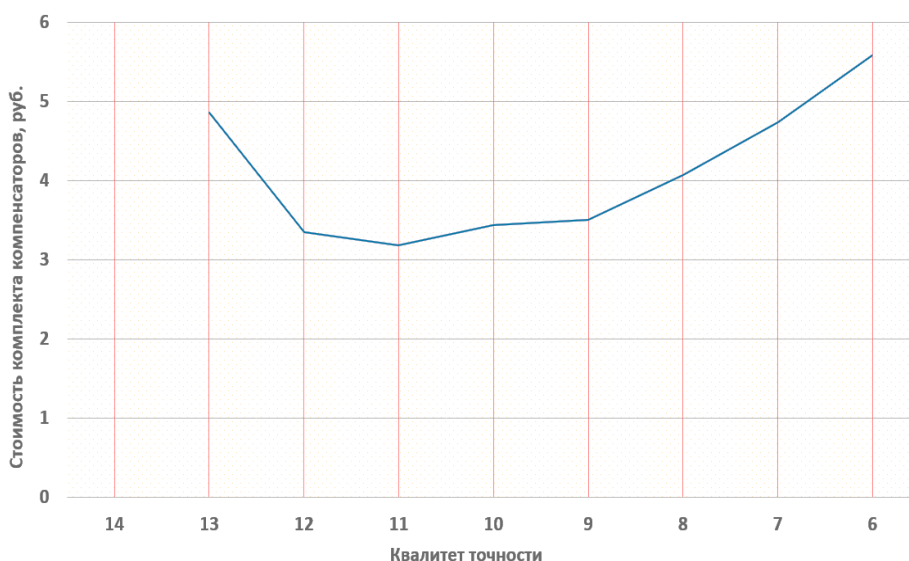


Рисунок 2 – График зависимости себестоимости комплекта регулировочных шайб форсунки ЯЗДА 273-20 от номера квалитета точности их толщины

Из графика видно, что минимальную себестоимость будет иметь комплект регулировочных шайб с точностью толщины по 11 квалитету. Шайбы с точностью толщины по 14 квалитету не соответствуют условию достижения точности размера полости под пружину, поэтому для них стоимость не определялась. Малое отличие стоимостей шайб с точностью толщины по 9 и 10 квалитетам обусловлено одинаковым составом методов и стадий их обработки и незначительным различием припусков и режимов резания на чистовое и получистовое фрезерование таких шайб. Необоснованное назначение точности регулировочных шайб по 13 и 6 квалитетам приведет к увеличению затрат на обработку плоскостей шайб в 1,5 и 1,75 раза, соответственно, хотя и удовлетворяет условию достижения точности. Это свидетельствует об экономической целесообразности использования предлагаемой методики оптимизации допусков толщин компенсаторов.

Заключение

Реализация предлагаемого подхода к определению параметров точности сборочной оснастки и компенсаторов при достижении точности сборки методом регулирования позволяет повысить эффективность определения величины и ступени компенсации, числа неподвижных компенсаторов, а также оптимальных допусков компенсаторов во взаимосвязи с параметрами точности сборочных работ и оснастки. Разработанная методика оптимизации допусков компенсаторов позволяет в 1,5...2 раза сократить себестоимость изготовления комплекта компенсаторов на каждый экземпляр собираемого изделия. Она может быть полезна инженерам-технологам, занимающимся проектированием техпроцессов сборки машин.

Список цитированных источников

1. Маталин, А. А. Технология машиностроения: учебник / А. А. Маталин. – 5-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2020. – 512 с.
2. Солонин, И. С. Расчет сборочных и технологических размерных цепей / И. С. Солонин, С. И. Солонин. – М. : Машиностроение, 1980 – 110 с.
3. Технология машиностроения (специальная часть): учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. А. Гусев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1986. – 480 с.
4. Справочник технолога-машиностроителя : в 2-х т. / под ред. А. М. Дальского [и др.]. – 5-е изд. перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2001.
5. Обработка металлов резанием: справочник технолога / А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм ; под общ. ред. А. А. Панова. – М. : Машиностроение, 1988. – 736 с.
6. Расчеты экономической эффективности новой техники: справочник / под общ. ред. К. М. Великанова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1990. – 448 с.

References

1. Matalin, A. A. Tekhnologiya mashinostroeniya: uchebnik / A. A. Matalin. – 5-e izd., ster. – Sankt-Peterburg : Lan', 2020. – 512 s.
2. Solonin, I. S. Raschet sborochnyh i tekhnologicheskikh razmernykh cepej / I. S. Solonin, S. I. Solonin. – M. : Mashinostroenie, 1980 – 110 s.
3. Tekhnologiya mashinostroeniya (special'naya chast'): uchebnik dlya mashinostroitel'nyh special'nostej vuzov / A. A. Gusev [i dr.]. – M. : Mashinostroenie, 1986. – 480 s.
4. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya : v 2-h t. / pod red. A. M. Dal'skogo [i dr.]. – 5-e izd. pererab. i dop. – M. : Mashinostroenie, 2001.
5. Obrabotka metallov rezaniem: spravochnik tekhnologa / A. A. Panov, V. V. Anikin, N. G. Bojm ; pod obshch. red. A. A. Panova. – M. : Mashinostroenie, 1988. – 736 s.
6. Raschety ekonomicheskoy effektivnosti novej tekhniki: spravochnik / pod obshch. red. K. M. Velikanova. – 2-e izd., pererab. i dop. – L. : Mashinostroenie, 1990. – 448 s.

Материал поступил 26.02.2024, одобрен 14.03.2024, принят к публикации 28.03.2024