

# ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ НОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

Рассмотрены вопросы рационализации норм точности функциональных параметров изделий, в основу которой положена оптимизация конструкторских размерных цепей.

**В**ыпуск продукции высокого качества рассматривается во всех странах мира как одно из важнейших условий развития национальной экономики, от которого зависят темпы промышленного развития, эффективность использования всех видов ресурсов, успехи внешней торговли и национальный престиж страны на международной арене. Конкурентоспособность выпускаемой продукции является одним из важнейших условий обеспечения реальной как экономической, так и политической независимости государства. Все это в полной мере относится и к Республике Беларусь, которая, не имея реальной возможности развиваться за счет экспорта сырьевых, топливно-энергетических ресурсов в качестве основного источника экономического роста должна рассматривать повышение конкурентоспособности продукции отечественных предприятий на базе имеющихся интеллектуальных ресурсов. Конкурентоспособность продукции зависит от многих факторов, основными из которых являются уровень ее эксплуатационных свойств или характеристик и себестоимость. Продукция промышленных предприятий Рес-

публики Беларусь, во многих случаях не уступая по своим эксплуатационным показателям зарубежным аналогам, а в некоторых случаях и превосходя их, как правило, проигрывает им по себестоимости. Основной причиной этого является, прежде всего, низкая эффективность применяемых технологических процессов, а также высокая материалоемкость, энергоемкость и трудоемкость отечественной продукции. Выделенные причины определяют основные направления, по которым в настоящее время ведутся работы по снижению себестоимости продукции. Следует отметить, что реализация этих направлений требует значительных капиталовложений и длительного времени на их освоение и получение ощутимого эффекта. Все это обуславливает необходимость поиска и развития более эффективных подходов к снижению себестоимости продукции отечественных предприятий.

Как один из вариантов повышения качества изделий может рассматриваться оптимизация норм точности конструкторских размерных цепей. Нами предлагается методика нормирования функциональных параметров с

учетом затрат на их реализацию, которая может быть применена при проектировочных расчетах. Методика позволяет распределить точность замыкающего звена размерной цепи между составляющими звеньями, учитывая затраты на изготовление, таким образом, чтобы технологичность цепи была максимальной. Наиболее характерным показателем технологичности может считаться технологическая себестоимость. Таким образом, решается задача оптимизации, для проведения которой необходимо сформировать массив исходных данных.

Первоначально определяется возможный диапазон допусков для каждого составляющего звена размерной цепи исходя из особенностей эксплуатации и конструкции изделия. Затем для каждого составляющего звена размерной цепи рассчитывается зависимость «показатель технологичности — допуск» при возможных уровнях точности.

Под показателем технологичности будем понимать комплексный (обобщенный) показатель, являющийся объективным критерием для оценки качества элемента с точки зрения трудоемкости и себестоимости следующего вида:

$$Q = \sum_{i=1}^n k_i \cdot t_i, \quad (1)$$

где  $Q$  — комплексный (обобщенный) показатель технологичности элемента;  $k_i$  — коэффициент относительной стоимости  $i$ -й технологической операции, приведенный к единице времени;  $t_i$  — время, затрачиваемое на выполнение  $i$ -й технологической операции;  $n$  — общее количество операций технологического процесса получения рассматриваемого элемента детали.

Для определения коэффициентов  $k_i$  рекомендуется применение обобщенного подхода, базирующегося на использовании

предварительно рассчитанных укрупненных нормативов себестоимости работы оборудования соответствующих типоразмеров. В общем случае нормативы должны учитывать затраты, приходящиеся на один час работы базового и  $i$ -го оборудования: на заработную плату (с отчислениями) основных и вспомогательных рабочих; амортизацию и ремонт оборудования; энергию; вспомогательные материалы, необходимые для обслуживания оборудования; амортизацию и ремонт универсальных приспособлений; амортизацию, ремонт и заточку режущего инструмента; содержание зданий; прочие цеховые расходы.

Для создания шкалы коэффициентов из какого-либо наиболее распространенного оборудования выбирают наиболее характерный станок-представитель и его принимают за базу с коэффициентом равным единице. Коэффициенты относительной стоимости технологических операций, выполняемых на других станках, определяются по формуле:

$$k_i = \frac{C_i}{C_6}, \quad (2)$$

где  $C_i$ ,  $C_6$  — нормативы затрат, приходящихся на один час работы базового и  $i$ -го оборудования.

Необходимым условием при расчете коэффициентов является сопоставимость стоимостных показателей, для чего они должны относиться к одному и тому же временному интервалу.

В качестве времени, затрачиваемого на выполнение  $i$ -й технологической операции, рекомендуется использовать «неполное штучное время», т. к. оно содержит те составляющие, которые не только зависят от протяженности, конфигурации, материала и точности обрабатываемого элемента, но и изменяются при повышении или понижении точно-

сти: основное время, вспомогательное время (за исключением части, связанной с установкой детали), а также время, затрачиваемое на отдых и организационно-техническое обслуживание.

Таким образом, формируется исходная база, которая может быть разработана для условий конкретного предприятия и ориентирована на конкретные технологические операции и оборудование. В нашей методике табличные зависимости «показатель технологичности — допуск» каждого составляющего звена аппроксимируются обобщенной степенной зависимостью (нами доказано, что она достаточно адекватно описывает исходные данные):

$$Q_i(\delta_i) = A_i + C_i \cdot \delta_i^{p_i}, \quad (3)$$

где  $Q_i$  — показатель технологичности звена размерной цепи;  $\delta_i$  — допуск звена размерной цепи;  $A_i$ ,  $C_i$ ,  $p_i$  — параметры аппроксимирующей функции.

Аналитические зависимости для назначения технологически обоснованных допусков на составляющие звенья размерной цепи выведены методом оптимизации с использованием множителей Лагранжа.

Расчет на максимум-минимум (по прегельным значениям). Неопределенный множитель  $\lambda$  находим путем последовательного приближения, используя параметры  $C_i$ ,  $p_i$  аппроксимирующих исходные данные функций для каждого составляющего звена. Значение  $\lambda$ , при котором величина  $\delta$  равна допуску замыкающего звена  $\delta_\Delta$ , является искомым:

$$\delta = \sum_{i=1}^n e^{\frac{1}{p_i-1} \ln \left( \frac{\lambda}{C_i \cdot p_i} \right)} \quad (4)$$

Оптимизированные допуски на составляющие звенья размерных цепей определяются по следующей формуле:

$$\delta_i = e^{\frac{1}{p_i-1} \ln \left( \frac{\lambda_i}{C_i \cdot p_i} \right)}. \quad (5)$$

Вероятностный расчет размерной цепи. Производится замена переменных, в результате чего вероятностный метод расчета сводится к расчету по предельным значениям:

$$B_i = \frac{k_i^2 \delta_i^2}{k_\Delta^2}, \quad B = \delta_\Delta^2; \quad (6)$$

$$C_i^* = \frac{C_i \cdot k_i^{p_i}}{k_\Delta^{p_i}}, \quad p_i = p_i/2, \quad (7)$$

где  $B_i, B, C_i^*, p_i$  — скорректированные параметры исходных данных,  $k_i, k_\Delta$  — коэффициенты относительного рассеяния  $i$ -го и замыкающего звеньев.

Для нахождения неопределенного множителя  $\lambda$  используются результаты аппроксимации табличных зависимостей «показатель технологичности — допуск» (параметры  $C_i, p_i$ ) для каждого составляющего звена с последующей заменой переменных. Аналогично методу максимума-минимума определяется значение  $\lambda$ :

$$B = \sum_{i=1}^n e^{\frac{1}{p_i-1} \ln \left( \frac{\lambda}{C_i^* p_i} \right)}. \quad (8)$$

Величина  $\lambda$ , при которой значение функции  $B$  равно допуску замыкающего звена, является искомой.

Находим оптимизированные допуски на составляющие звенья размерной цепи:

$$B_i = e^{\frac{1}{p_i-1} \ln \left( \frac{\lambda}{C_i^* p_i} \right)}; \quad (9)$$

$$\delta_i = \frac{k_\Delta}{k_i} \sqrt{B_i}. \quad (10)$$

Описанная методика оптимизации размерных цепей апробирована при решении задачи беспритирочной сборки узла «седло-клапан» механизма газораспределения двигателя внутреннего сгорания.

В результате функционального анализа механизма составлена размерная цепь  $A$ , включающая четыре составляющих звена, отклонения которых приводят к появлению зазора в сопряжении:

$A_1$  — отклонение от круглости рабочей фаски клапана;

$A_2$  — отклонение от соосности рабочей фаски и стержня клапана;

$A_3$  — отклонение от круглости рабочей фаски седла;

$A_4$  — отклонение от соосности рабочей фаски седла и внутренней поверхности направляющей втулки.

Все составляющие звенья относятся к отклонениям формы и расположения поверхностей, т. е. они случайны по величине и по направлению, а их номинальные значения равны нулю. Отклонение от соосности имеет симметричный допуск, а отклонение от круглости расположено в одну сторону (в тело детали).

Значения коэффициентов относительной асимметрии  $\alpha$  и относительного рассеивания  $k$  для всех звеньев приняты соответственно 0 и 1, т. к. массовый тип производства предполагает отлаженность технологического процесса.

Замыкающим звеном цепи следует считать зазор в сопряжении «коническая поверхность клапана — коническая поверхность седла». Его величина не должна превышать 70 мкм. Большая часть этого зазора компенсируется деформацией тарелки клапана и седла под воздействием давления газов в цилиндре (до 60 мкм, согласно данным работы [1]), кроме этого герметизации способствует явление облитерации (до 10 мкм, согласно данным того же источника). Таким образом, допуск замыкающего звена  $[\delta_\Delta]$  может быть равен 70 мкм.

Поскольку все составляющие звенья размерной цепи являются векторными параметрами, при сложении их допусков следует учитывать случайный характер направления их отклонений, поэтому при расчете используют коэффициент 0,85 [2]:

$$\delta_\Delta = 0,85 \sqrt{\sum \xi_i^2 \delta_i^2}. \quad (11)$$

Проанализируем влияние выделенных составляющих звеньев на замыкающее звено. Звенья  $A_1$  и  $A_3$  — отклонения от круглости — имеют коэффициенты влияния  $\xi_1 = \xi_3 = +1$ . По данным работы [1] отдельно контролируемого в технологическом процессе требования к погрешностям формы деталей сопряжения устанавливать не следует, если допустимое биение установлено до 20...30 мкм. Погрешности формы такого порядка всегда устраняются деформациями самих изделий. Поэтому допуски на звенья  $A_1$  и  $A_3$  оставим такие, какие указаны на чертежах — 6 мкм.

Звенья  $A_2$  и  $A_4$  имеют увеличивающие коэффициенты, обусловленные большим вылетом рабочих элементов (высоты сопрягаемых фасок клапана и седла значительно меньше высоты сопряжения стержня клапана со втулкой), поэтому небольшое отклонение от соосности приводит к значительному увеличению зазора в сопряжении. Геометрическим методом определены аналитические зависимости влияния отклонения от соосности на зазор в сопряжении:

■ звено  $A_2$

$$\xi_2 \delta_2 = 81,2 \cdot \sin \left( \frac{1}{2} \arctg \frac{\delta_2}{4,85} - 1' \right) \times \sin \left( 44^\circ 31' - \frac{1}{2} \arctg \frac{\delta_2}{4,85} \right) \quad (12)$$

■ звено  $A_4$

$$\xi_4 \delta_4 = 81,2 \times \sin \left( \frac{1}{2} \arctg \frac{\delta_4}{1,56} - 1' \right) \times \sin \left( 44^\circ 31' - \frac{1}{2} \arctg \frac{\delta_4}{1,56} \right). \quad (13)$$

Поскольку выделение коэффициентов влияния из полученных формул вызывает трудности, для дальнейших расчетов будем использовать непосредственно величины  $\xi_2 \delta_2, \xi_4 \delta_4$ , определив их по вышеприведенным формулам (12) и (13).

Решение прямой задачи подтвердило невозможность обеспечения требуемого качества (герметичности) сопряжения «клапан-седло» при назначенных нормах точности на функциональные параметры. В качестве выхода из этой ситуации было предложено оптимизировать допуски на параметры по критерию обеспечения точности замыкающего звена при минимальной технологической себестоимости цепи, используя вышеназванную методику.

Показатели технологичности  $Q$  были рассчитаны с помощью существующих нормативов штучно-калькуляционного времени на работы, выполняемые на металлорежущих станках, для различных типов производства и шкалы относительных коэффициентов, созданных на основе справочных данных стоимости машино-часа эксплуатации оборудова-

ния. В процессе расчета рассматривалось по три возможных технологических процесса получения элементов деталей — звеньев размерной цепи и были выбраны оптимальные с точки зрения трудоемкости и себестоимости.

Табличные зависимости «показатель технологичности — допуск» каждого составляющего звена были аппроксимированы обобщенной степенной зависимостью (3) настоящей методики, для этого была использована программа Mathcad. По формуле (8) найдено значение неопределенного множителя Лагранжа  $\lambda$ , оптимизированные допуски на составляющие звенья размерной цепи определены по формулам (9), (10).

Предложенная методика позволяет назначать экономически обоснованные допуски на составляющие звенья размерных цепей

(на более «затратные» звенья допуски шире, чем на менее «затратные»), обеспечивая тем самым минимальную технологическую себестоимость изделия в целом.

#### Литература

1. Янстикене И.А. Исследование технологического процесса герметизации клапанов механизма газораспределения тракторных двигателей при ремонте. Автореферат диссертационной работы, 1974. — 15 с.
2. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Расчет допусков размеров. — М.: Машиностроение, 1981 — 189 с.
3. Левин Г.М., Соколовский С.С., Соломахо В.Л., Спесивцева Ю.Б. Элементы информационного обеспечения оптимизации конструкторских размерных цепей. / Моделирование и информационные технологии проектирования: Сборник научных трудов НАНБ, 2002. — С. 159–171.

Рецензент: доктор технических наук, профессор Ж.А. МРОЧЕК