

Задачи проектирования допусков параметров изделий машиностроения



А.А. Ивахненко

аспирант кафедры «Управление качеством, метрология и сертификация» ЮЗГУ; г. Курск



Л.М. Червяков

д.т.н., профессор, первый проректор, профессор кафедры «Управление качеством, метрология и стандартизация» ЮЗГУ; г. Курск

Показателем качества продукции (Q) называется количественная характеристика одного или нескольких свойств, рассматриваемая применительно к определенным процессам ее жизненного цикла [1]:

$$Q = Q(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_m\}$ – вектор единичных показателей качества (m – их количество); x_i – параметры изделия, $i = 1, \dots, n$ (n – количество параметров, оказывающих влияние на формирование показателей качества).

В работах профессора И.М. Колесова (см. например [2]) было установлено, что структура любой машины характеризуется всего двумя видами связей, а именно – размерными связями (РС) и связями свойств материалов (ССМ). Это означает, что все параметры изделия x_i характеризуют значения размеров, формы и расположения номинальных поверхностей или свойств материалов и имеют соответствующие размерности. При этом номинальные значения параметров устанавливаются при проектировании машины, а действительные значения параметров получаются при ее изготовлении, сборке, эксплуатации, ремонте, модернизации и т.п. Показатели качества изделий машиностроения являются функциями параметров и могут иметь различные размерности, либо не иметь их вовсе.

Процессы проектирования машин включают три основных этапа [3]:

- 1) структурный (функциональный) синтез;
- 2) параметрический синтез;
- 3) синтез допусков.

До начала процесса проектирования машины осуществляется формирование вектора Q на основе учета потребностей и ожиданий потребителей

или требований заказчика. На первых двух этапах формируются размерные связи и связи свойств материалов для обеспечения номинальных значений показателей качества продукции. На последнем этапе, исходя из заданных значений отклонений к показателям качества продукции ΔQ_j ($j = 1, \dots, m$), устанавливаются допускаемые величины отклонений параметров Δx_i .

На основе анализа установленных свойств единичных показателей качества (рис. 1) авторами предложен подход к систематизации задач проектирования допусков на значения параметров машин. За пределами этой систематизации остались рассмотрение конкретных этапов жизненного цикла и свойств самой продукции, которые учитываются на первых двух этапах процесса ее проектирования.

Проявление свойства 1.2, т.е. отсутствие зависимости единичного показателя качества от параметров изделия типа (1), означает, что на третьем этапе процесса проектирования будет решаться задача назначения допусков, а не их расчета. Такое назначение допусков будет выполняться конструктором на основании его опыта, по аналогии с другими подобными машинами или их узлами либо на основании его представлений о целесообразности, рациональности или оптимальности. Вследствие этого почти всегда производится корректировка значений величин допусков параметров после изготовления и испытаний опытных образцов изделий. Отметим, что в этом случае находят применение методы искусственного интеллекта и когнитивные технологии. Рассмотренные далее задачи синтеза допусков относятся к выполнению свойства 1.1. В отличие от задач проектирования допусков, их назначение при доводке опытного образца изделия или при выборе рациональных режимов обработ-

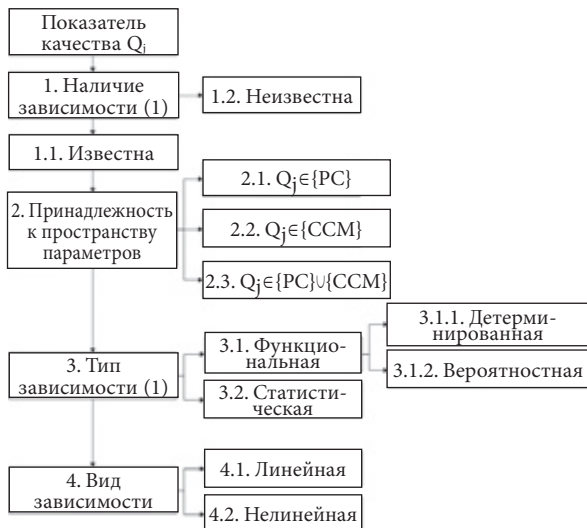


Рис. 1. Свойства единичного показателя качества Q_i

ки не требует обязательного наличия зависимости (1). Например, оборудование для нанесения гальванических покрытий зачастую производится предприятиями самостоятельно, наряду с другими видами оборудования и оснастки, с использованием специальных справочников, содержащих варианты их конструкций и общие рекомендации по применению. Для таких случаев не обязательно выполнять установление зависимости типа (1), а можно использовать методы теории чувствительности для определения влияния отклонений параметров Δx_i на величину отклонения показателей качества ΔQ [4], т.е. экспериментально установить зависимость следующего вида:

$$\Delta Q = Q(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n). \quad (2)$$

К типичным задачам синтеза допусков при реализации свойств 2.1, 3.1.1 и 4.1 относятся проектные расчеты размерных цепей – решение прямых задач [5], однако их особенностью является то, что здесь единичный показатель качества, который характеризует замыкающее звено, может являться как номинальной величиной, так и отклонением. Например, к показателям точности металлорежущих станков относятся как габаритные размеры рабочего пространства, так и величины биений и отклонений от точности перемещений.

При реализации свойства 3.1.1 зачастую известна функциональная зависимость для показателя качества требует уточнения, поскольку полученные с ее помощью результаты существенно расходятся с экспериментальными данными. Так в работе [6] при исследовании связей свойств материалов – зависимости модуля Юнга от концентрации элементов твердых растворов на примере сплава меди и цинка – было установлено, что

данная зависимость является полиномиальной, а не линейной, т.е. реализуется свойство 4.2, а не свойство 4.1. Оставшееся небольшое расхождение с экспериментальными данными можно было бы объяснить и учесть посредством реализации свойства 3.1.2, а не свойства 3.1.1, поскольку значения модулей Юнга элементов сплава и неоднородности самого твердого раствора имеют вероятностный характер. Хотя в данном примере и реализуется лишь свойство 2.2, но здесь можно использовать известный подход по обеспечению взаимозаменяемости изделий и сборочных единиц, раскрытый в [7] при реализации более общего свойства 2.3. В его основе лежит применение выражения для дифференциала функции многих переменных и приведены примеры проектирования допусков для предохранительного клапана с пружиной, работающей на сжатие, а также для малогабаритных электродвигателей постоянного тока с независимым возбуждением от постоянных магнитов.

Широкое применение в машиностроении получили соединения с натягом, в которых величина давления (p) на сопряженных поверхностях напрямую оказывает влияние на показатели качества машин через величины расчетных передаваемых нагрузок [8]. Величина давления p является одной из составляющих Q , которая имеет свойство 2.3, поскольку она является функцией РС – действительного расчетного натяга и ССМ – модулей упругости и коэффициентов Пуассона материалов охватываемой и охватывающей деталей. При определении действительного расчетного натяга учитывают свойство 3.1.2, полагая, что действительные размеры сопрягаемых поверхностей имеют нормальное распределение в пределах поля допуска, а модули упругости и коэффициенты Пуассона считают константами, для которых реализуется свойство 3.1.1. в отличие от упомянутых выше примеров из [7], в которых для свойств материалов учитывают свойство 3.1.2. Из применяемых при проектировании зависимостей невозможно определить величину отклонения Δp , а следствием этого является то, что тяжелые и особо тяжелые посадки рекомендуется проверять опытным путем, а не расчетом.

Для случая реализации у показателя качества свойств 3.2 и 4.1, т.е. когда связи между показателями качества и параметрами описываются линейными регрессионными моделями, вида $y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i$ (в работе [9] для процессов) рассмотрено полное приращение (вариация) значения выходного параметра

$$\Delta y = \Delta a_0 + \sum_{i=1}^n \Delta a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_i \Delta x_i. \quad (3)$$

Расчет допусков на независимые параметры процесса осуществлялся по зависимости (4), полученной путем преобразования выражения (3) и введения в рассмотрение вместо приращений Δy и Δx_i величин допусков на зависимый параметр T_y и независимые параметры T_{x_i} , а также значений весовых коэффициентов b_i

$$T_{x_i} = \frac{b_i}{a_i} \left(T_y - (\Delta a_0 + \sum_{i=1}^n \Delta a_i x_{mi}) \right), \quad (4)$$

где T_{x_i} – допуск на независимый параметр процесса; b_i – значимость параметра x_i , учитывающая сложность управления этим параметром, получаемая на основе экспертных оценок, $\sum_{i=1}^n b_i = 1$; a_i – оценка коэффициента уравнения регрессии; T_y – допуск на выходной параметр; Δa_i – вариация коэффициента a_i при параметре x_i , равная величине доверительного интервала; x_{mi} – среднее значение параметра x_i .

Очевидно, что здесь значения допусков на независимые параметры зависят от значений взаимосвязанных величин доверительной вероятности и доверительного интервала. При этом, для любых значений доверительной вероятности неизбежно появление бракованной продукции, а попытки уменьшить ее долю могут привести к назначению таких допусков на x_i , которые будет невозможно обеспечить на практике. Отметим, что в работах [10, 11] отождествили статистические и функциональные зависимости, т.е. вместо полной вариации использовали дифференциалы функций и не учли первые два члена правой части (3), что привело к назначению широких допусков на x_i , появлению большой доли несоответствующей продукции и необходимости вводить сплошной выходной контроль качества.

В работе [9] были рассмотрены только линейные регрессионные модели. При расчете допусков при наличии нелинейной регрессии (проявлении свойств 3.2 и 4.2) появится необходимость учета статистических моментов более высокого порядка. Например, для квадратичной регрессии вида $y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$ при заданном значении величины допуска на зависимый параметр T_y , допуск на независимый параметр будет определяться по следующей зависимости:

$$T_x = \frac{T_y - \Delta a_0 - a_1 x_m - \Delta a_2 (s^2 + x_m^2)}{\Delta a_1 + 2a_2 x_m}, \quad (5)$$

где s^2 – выборочная дисперсия независимой переменной (не отклика!).

Здесь следует отметить, что при получении регрессионных зависимостей показателей качества от

независимых переменных полагают, что дисперсия последних равна нулю. При проектировании допусков данные независимые переменные являются параметрами изделия, дисперсия которых принципиально не может быть равна нулю.

При наличии в уравнении регрессии члена x^3 выражение для допуска на него будет включать асимметрию, а при наличии члена x^4 – эксцесс независимой переменной. Учет влияния статистических моментов высокого порядка для независимой переменной открывает широкие возможности для управления допуском на независимый параметр путем рационального планирования эксперимента.

Рассмотрим теперь более общий случай, когда связи в (1) описываются регрессионными моделями, учитывающими эффекты от взаимодействия между факторами, например, вида:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j, \quad j \geq 1, \quad (6)$$

для случая $n = 2$.

Исходя из предпосылок для (3), расширенным аналогом (4) будут являться выражения:

$$T_{x1} = \frac{b_1 T_y^*}{(a_1 + 2a_{11} x_{m1} + a_{21} x_{m2})},$$

$$T_{x2} = \frac{b_1 T_y^*}{(a_{21} + 2a_{22} x_{m2} + a_{21} x_{m1})}, \quad (7)$$

где

$$T_y^* = T_y - (\Delta a_0 + \Delta a_1 x_{m1} + \Delta a_2 x_{m2} + \Delta a_{11} (s_{x1}^2 + x_{m1}^2) + \Delta a_{21} x_{m1} x_{m2} + \Delta a_{22} (s_{x2}^2 + x_{m2}^2)).$$

В случае если независимые параметры оказывают влияние на несколько выходных параметров, т.е. имеется система линейных регрессионных моделей для различных показателей качества, включающих одни и те же независимые переменные $Y = A_0 + A_1 X$, для расчета допусков следует использовать следующее выражение, полученное на основе вариации исходной системы:

$$\Delta X = (A_1^T A_1)^{-1} A_1^T (\Delta Y - \Delta A_0 - \Delta A_1 X), \quad (8)$$

где T – символ транспонирования.

Выражение (8) действительно при условии, что количество показателей качества (регрессионных уравнений) больше количества независимых пере-



менных. При их равенстве это выражение значительно упростится:

$$\Delta X = A_1^{-1} (\Delta Y - \Delta A_0 - \Delta A_1 X). \quad (9)$$

Важным следствием анализа выражений (8) и (9) является то, что в определенных и переопределенных системах линейных уравнений, описывающих связи между входными и выходными переменными в продукции и процессах, невозможно использовать весовые коэффициенты, как в (4) и (7). Это является принципиальным отличием от обычных задач в линейной алгебре, поскольку снижает потенциальные возможности управления качеством продукции и процессов. Аналогом (3) и (4) являются уравнения размерных цепей, в которых выходной показатель качества – точность замыкающего звена, имеется только одно функциональное уравнение типа (1) и имеется возможность назначать весовые коэффициенты на основе методов равных допусков, равных квалитетов и др.

В работе [12] рассмотрена новая постановка задачи робастной оптимизации, на основе которой разработан метод, позволяющий совместить ряд задач синтеза параметров и допусков для повышения качества процесса проектирования продукции и процессов. Основой как этого метода, так и рассмотренных примеров, соответствующих зависимостям (3)–(9), является рассмотрение полной вариации показателя качества (свойства 3.1 или 3.2), т.е. его изменения, вызванного как изменением параметров, так и вида зависимости – вариации связи. Так закон Гука выполняется только при малых деформациях, и при превышении предела пропорциональности связь между напряжениями и деформациями становится нелинейной, а для многих сред этот закон неприменим даже при малых деформациях. Использование полной вариации вместо дифференциала для определения допусков показателей качества и параметров изделия (процессов) зачастую оказывается более обоснованным, хотя в обоих случаях рассматриваются лишь малые изменения независимых параметров.

Таким образом, в статье предложен подход к систематизации задач проектирования допусков на значения параметров изделий, при котором показатели качества машин зависят от их размерных связей и связей свойств материалов. Для линейных и нелинейных, функциональных и статистических зависимостей показателей ка-

чества машин от их параметров обосновано применение полной вариации этих зависимостей для повышения точности при решении задач проектирования допусков.

Литература

1. Хорошев А.Н. Введение в управление проектированием механических систем. – Белгород, 1999. – 372 с.
2. Колесов И.М. Основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1997. 592 с.
3. Genichi Taguchi, Subir Chowdhury, Yui Wu. Taguchi's Quality Engineering Handbook/Wiley-Interscience, 2004. 1696 p.
4. Сторублев М.Л. Разработка методик управления качеством продукции на основе анализа взаимодействия процессов и определения связей между их параметрами. Автореферат дисс. ... к.т.н. ... : 05.02.23. СПб, 2009. 18 с.
5. РД 50-635-87. Методические указания. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета линейных и угловых цепей.
6. Мосин Ю.В., Преснецова В.Ю., Ромашиной С.Н., Сами Аль Шатеби. Связь модулей упругости твердого раствора с концентрацией компонент // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. № 1(309) 2015. С. 17-22.
7. Якушев А.И., Воронцов Л.Н., Федотов Н.М. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. Учебник. М.: Машиностроение, 1987.
8. Кузьмин А.В. и др. Расчеты деталей машин: Справ. Пособие / А.В. Кузьмин, И.М. Чернин, Б.С. Козинцов. Мн.: Выш. шк., 1986. – 400 с.
9. Гатилова Е.В. Управление качеством процесса розлива ликероводочной продукции. Автореферат дисс. ... к.т.н. ... : 05.02.23. Курск, 2012. 16 с.
10. Гудков М.А. Модификация диеновых каучуков смесью фуллеренов в технологии резин повышенного качества. Автореферат дисс. ... к.т.н. : 05.17.06, 05.02.23. Воронеж, 2013. 18 с.
11. Акатов Е.С. Модификация гомо- и сополимеров этилена углеродными наноматериалами с целью управления свойствами композитов и изделий на их основе. Автореферат дисс. ... к.т.н. : 05.17.06, 05.02.23. Воронеж, 2013. 18 с.
12. Ивахненко А.А., Червяков Л.М. Планирование качества изделий машиностроения на основе робастного проектирования // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. № 4(300). С. 131-135.