

В.Д. Баскаков, О.В. Зарубина, Т.В. Васильева

ОБОСНОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ ТОЧНОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАШИН

Разработаны математические модели и алгоритмы для одновременного определения точности конструктивных параметров машин и технологических средств ее обеспечения. Получены соотношения для оценки производственной технологичности создаваемой машины.

E-mail: baskakov_vd@mail.ru

Ключевые слова: конструктивные параметры, поля рассеяния погрешности, рациональная точность, технико-экономические показатели, оптимизационная задача.

Проблема создания конкурентоспособных машин с рациональной точностью конструктивных параметров (КП) актуальна для современного производства. Традиционный путь ее решения предполагает назначение точности разработчиком конструкторской документации (ГОСТ 14.201—83) и подтверждение возможности практической реализации точности технологом [1]. В случае предполагаемых серьезных затруднений при изготовлении машин точность ее КП корректируется.

Несмотря на значительный объем исследований в этой области, процедура согласования точности КП недостаточно подробно регламентирована и формализована. Это затрудняет поиск рациональных решений по точности конструкции машин, увеличивает их трудоемкость и себестоимость в серийном производстве.

Проведем формализацию процедуры согласования точности КП разрабатываемой машины в целях принятия однозначного рационального конструкторско-технологического решения. Для этого будем учитывать влияние полей рассеяния Γ^i погрешностей конструкции машины ($i = 1, 2, \dots, I$ — индекс КП; I — число КП) на вероятностные значения ее эксплуатационных характеристик L_{Pf} (P — индекс, указывающий на вероятностную природу показателя L_{Pf} ; $f = 1, 2, \dots, F$ — порядковый номер эксплуатационной характеристики; F — число эксплуатационных характеристик машины) и технико-экономические показатели F_j производства ($j = 1, 2$ — соответственно финансовые и временные затраты):

$$\bar{L}_{Pf} = 1 - \Delta \bar{L}_{Pf}(\bar{\Gamma}^i); \quad \bar{F}_j = 1 + \bar{F}_{1j}(\bar{\Gamma}^i), \quad (1)$$

где $\bar{L}_{Pf} = \frac{L_{Pf}}{L_{f \max}}$; $\Delta \bar{L}_{Pf}(\bar{\Gamma}^i) = \frac{\Delta L_{Pf}(\bar{\Gamma}^i)}{L_{f \max}}$; $\bar{F}_j = \frac{F_j}{F_{0j}}$; $\bar{F}_{1j}(\bar{\Gamma}^i) = \frac{F_{1j}(\bar{\Gamma}^i \cdot \Gamma_{\text{пр}}^i)}{F_{0j}}$; $\bar{\Gamma}^i = \frac{\Gamma^i}{\Gamma_{\text{пр}}^i}$; $\Gamma_{\text{пр}}^i$ — поле рассеяния i -го КП изделия-

прототипа; $L_{f \max}$ — максимальное значение f -й эксплуатационной характеристики при идеальной точности ($\Gamma^i = 0$) изготовления машины; $\Delta L_{Pf}(\Gamma^i)$ — составляющая f -й эксплуатационной характеристики машины, определяемая точностью ее изготовления, при этом если $\Gamma^i \rightarrow 0$, то $\Delta L_{Pf}(\Gamma^i) \rightarrow 0$; F_{0j} — составляющие финансовых и временных затрат, не зависящие от точности КП; $F_{1j}(\Gamma^i)$ — составляющие затрат, определяемые обеспечением точности.

Под L_{Pf} будем понимать вероятностное значение эксплуатационной характеристики f в партии одинаковых машин, снижающееся с ростом полей рассеяния Γ^i погрешностей КП. Подобными машинами, изготавливаемыми в условиях крупносерийного и массового производства, являются, например, электроинструменты — дрели, шлифовальные машины (L_{P1} — ресурс инструмента; $\bar{\Gamma}^i$ — геометрические погрешности деталей, входящих в состав шпиндельного узла), кумулятивные перфораторы нефтяных и газовых скважин (L_{P1} — глубина пробоины в грунте; $\bar{\Gamma}^i$ — геометрические погрешности деталей перфоратора и структурные неоднородности применяемых для их изготовления материалов).

В дополнение к выражениям (1) примем существование зависимости полей рассеяния Γ^i погрешностей КП машины от начальных свойств Γ_{0n}^t технологической системы (t — номер начального свойства). Группу начальных свойств составляют параметры материалов и полуфабрикатов, используемых на предприятии для производства данного изделия, а также свойства применяемого оборудования и технологического оснащения. Начальные свойства Γ_{0n}^t , определяющие значения Γ^i , имеют, в основном, точностную природу и представляют собой поля рассеяния первичных погрешностей технологической системы (например, разностенность штампованной заготовки, биение шпинделя токарного станка, деформации заготовки под действием сил закрепления). Подстрочный индекс n в обозначении Γ_{0n}^t , являющийся номером варианта технологического процесса изготов-

ления машины, показывает, что требуемая точность Γ^i может быть обеспечена различными технологиями.

Представим обобщенную зависимость Γ^i от Γ_{0n}^t в безразмерном виде:

$$\bar{\Gamma}^i = \bar{\Gamma}^i(\bar{\Gamma}_{0n}^t), \quad (2)$$

где $\bar{\Gamma}_{0n}^t = \frac{\Gamma_{0n}^t}{\Gamma_{0np}^t}$ (Γ_{0np}^t — значение начального свойства Γ_{0n}^t в техно-

логическом процессе-прототипе — штатном технологическом процессе).

С учетом выражений (1), (2) рассмотрим оптимизационную задачу, формулируемую следующим образом: «При заданных верхних ограничениях $\bar{F}_2 \leq \bar{F}_{02}^* = F_{02}^*/F_{02}$ на временные затраты по обеспечению точности КП машины и нижних ограничениях \bar{L}_{pf}^* на ее эксплуатационные характеристики \bar{L}_{pf} определить n -й вариант маршрутного технологического процесса изготовления машины, соответствующий ему уровень начальных свойств $\bar{\Gamma}_{0n}^t = \bar{\Gamma}_{0Rn}^t$ технологической системы и точности $\bar{\Gamma}^i = \bar{\Gamma}_R^i$ КП, реализуемый с минимальными финансовыми затратами»:

$$\begin{cases} \bar{F}_{11}[\bar{\Gamma}^i(\bar{\Gamma}_{0n}^t)] \rightarrow \min; \\ 1 - \bar{F}_{02}^* + \bar{F}_{12}[\bar{\Gamma}^i(\bar{\Gamma}_{0n}^t)] \leq 0; \\ \Delta \bar{L}_{pf}[\bar{\Gamma}^i(\bar{\Gamma}_{0n}^t)] - (1 - \bar{L}_{pf}^*) \leq 0, \quad f = 1, 2, \dots, F; \\ -\bar{\Gamma}_{0n}^t \leq 0, \quad t = 1, 2, \dots, T, \end{cases} \quad (3)$$

где T — общее число начальных свойств технологической системы.

Возможны различные модификации задачи (3). Допустимо, например, использовать целевую функцию временных затрат на обеспечение точности, ограничивая при этом финансовые затраты. Возможен также вариант минимизации функции, представляющей собой линейную комбинацию затрат обоих видов.

Для произвольного n -го варианта технологического процесса изготовления машины решением задачи (3) являются рациональные значения $\bar{\Gamma}_{0Rn}^t$ полей рассеяния $\bar{\Gamma}_{0n}^t$ начальных свойств технологической системы, представляющие интерес для технологов (производителей машин в опытном и серийном производстве). Подставив $\bar{\Gamma}_{0n}^t = \bar{\Gamma}_{0Rn}^t$ в выражение (2), можно получить интересующие конструктора машины рациональные значения полей рассеяния $\bar{\Gamma}^i = \bar{\Gamma}_R^i$ погрешностей ее КП, а затем с помощью второго из соотношений (1)

вычислить достигнутый минимальный уровень $(\bar{F}_{1\min})_n$ финансовых затрат на обеспечение точности конструкции изделия.

В рамках задачи (3) технологичность решения по точности $\bar{\Gamma}^i$ КП разрабатываемой машины обеспечивается в n -м варианте технологии найденным рациональным комплексом $\bar{\Gamma}_{0n}^t = \bar{\Gamma}_{0Rn}^t$ начальных технологических свойств.

Для построения аналитических решений оптимизационной задачи (3) проведем следующие преобразования и упрощения.

1. Функциональную связь (2) в соответствии с работой [2] представим в линейной форме:

$$\bar{\Gamma}^i = \sum_{t=1}^T \bar{\alpha}_n^{ti} \bar{\Gamma}_{0n}^t, \quad (4)$$

где $\bar{\alpha}_n^{ti} = \alpha_n^{ti} \frac{\Gamma_{0np}^t}{\Gamma_{np}^i}$ (α_n^{ti} — технологический коэффициент преобразования t -го начального свойства в поле рассеяния погрешности i -го КП машины при выполнении n -го технологического процесса его изготовления).

2. Зависимость $\bar{L}_{Pf} = \bar{L}_{Pf}(\bar{\Gamma}^i)$ (см. соотношения (1)) представим также в линейном виде:

$$\bar{L}_{Pf} = 1 - \sum_{i=1}^I \bar{\delta}_f^i \bar{\Gamma}^i, \quad (5)$$

где $\bar{\delta}_f^i = \delta_f^i \frac{\Gamma_{np}^i}{L_{f\max}}$ (δ_f^i — коэффициент влияния поля рассеяния Γ^i i -й погрешности на вероятностное значение f -й эксплуатационной характеристики L_{Pf} машины).

3. Для оценки финансовых и временных затрат на обеспечение точности КП машины воспользуемся общепринятой в технологии машиностроения гиперболической зависимостью представления связи (1) себестоимости и трудоемкости продукции с точностью изготовления и запишем ее в следующем безразмерном виде [3]:

$$\bar{F}_j = 1 + \sum_{t=1}^T \frac{\bar{F}_{0jn}^t}{(\bar{\Gamma}_{0n}^t)^{g_{0n}}}. \quad (6)$$

Здесь $\bar{F}_j = \frac{F_j}{F_{0jn}}$, $\bar{F}_{0jn}^t = \frac{F_{0jn}^t}{F_{0jn} (\Gamma_{np}^t)^{g_{0n}}}$, где F_{0jn} , F_{0jn}^t , g_{0n} — константы гиперболической аппроксимации функций F_j .

Зависимости (5) не являются единственной формой представления технико-экономических показателей (1). Адекватно отражать характер изменения затрат обоих видов будет любая функция, обладающая следующей очевидной асимптотикой: $\bar{F}_j \rightarrow \infty$ при условии $\bar{\Gamma}^t \rightarrow 0$. Для оценки финансовых и временных затрат на обеспечение точности КП машины можно использовать логарифмическую функцию:

$$\bar{F}_j = 1 - \sum_{t=1}^T \bar{\Phi}_{0jn}^t \ln \bar{\Gamma}_{0n}^t, \quad (7)$$

где $\bar{F}_j = \frac{F_j}{\Phi_{0jn}}$; $\bar{\Phi}_{0jn}^t = \frac{\Phi_{0jn}^t}{\Phi_{0jn}}$ (Φ_{0jn} , Φ_{0jn}^t — константы логарифмической аппроксимации функции F_j).

4. Снимем ограничения на временные затраты по обеспечению точности КП машины и введем комбинированную (суммарную) технико-экономическую целевую функцию F_Σ , представляющую собой линейную комбинацию финансовых и временных затрат:

$$\bar{F}_\Sigma = \xi_1 \bar{F}_1 + \xi_2 \bar{F}_2 = 1 + \xi_1 \bar{F}_{11} + \xi_2 \bar{F}_{22}, \quad (8)$$

где ξ_1 , ξ_2 — коэффициенты, принимающие значения в диапазоне от 0 до 1, обладающие свойством $\xi_1 + \xi_2 = 1$ и характеризующие вклад соответственно финансовых и временных затрат в величину параметра \bar{F}_Σ .

5. Введем обобщенную (суммарную) эксплуатационную характеристику $\bar{L}_{P\Sigma}$ и представим ее в виде линейной комбинации частных эксплуатационных характеристик:

$$\bar{L}_{P\Sigma} = \sum_{f=1}^F \psi_f \bar{L}_{Pf} = 1 - \sum_{f=1}^F \psi_f \Delta \bar{L}_{Pf}(\bar{\Gamma}^i), \quad (9)$$

где ψ_f — безразмерный коэффициент вклада f -го эксплуатационного показателя в суммарную эксплуатационную характеристику $\bar{L}_{P\Sigma}$, обладающий свойством $\sum_{f=1}^F \psi_f = 1$.

Используем в качестве целевой функции комбинированную технико-экономическую характеристику \bar{F}_Σ , представленную соотношением (8). Ограничим нижним пределом $\bar{L}_{P\Sigma}^*$ суммарную эксплуа-

тационную характеристику $\bar{L}_{P\Sigma}$, определяемую зависимостью (9). Тогда с учетом выражений (4)—(6) можно записать упрощенный вариант оптимизационной задачи (3) с целевой функцией гиперболического вида:

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T \frac{\bar{F}_{0\Sigma n}^t}{(\bar{\Gamma}_{0n}^t)^{g_{0n}}} \rightarrow \min; \\ \sum_{t=1}^T \gamma_{\Sigma n}^t \cdot \bar{\Gamma}_{0n}^t - (1 - \bar{L}_{P\Sigma}^*) \leq 0; \\ -\bar{\Gamma}_{0n}^t \leq 0, \quad t = 1, 2, \dots, T, \end{cases} \quad (10)$$

где $\bar{F}_{0\Sigma n}^t = \xi_1 \bar{F}_{01n}^t + \xi_2 \bar{F}_{02n}^t$; $\bar{\gamma}_{\Sigma n}^t = \sum_{f=1}^F \psi_f \bar{\gamma}_{fn}^t$; $\bar{\gamma}_{fn}^t = \sum_{i=1}^I \delta_f^i \bar{\alpha}_n^{ti}$ — коэффициент влияния начального технологического свойства $\bar{\Gamma}_{0n}^t$ на эксплуатационную характеристику \bar{L}_{Pf} .

Задача (10) поставлена на множестве полей рассеяния начальных свойств технологической системы, она позволяет определить рациональную точность КП машины не прямо, а опосредованно. Решением этой задачи для n -го варианта технологического процесса изготовления машины будут рациональные значения $\bar{\Gamma}_{0Rn}^t$ начальных технологических свойств:

$$\bar{\Gamma}_{0Rn}^t = \frac{1 - \bar{L}_{P\Sigma}^*}{\sum_{t=1}^T \left[(\bar{\gamma}_{\Sigma n}^t)^{g_{0n}} \bar{F}_{0\Sigma n}^t \right]^{g_{0n}+1}} \left(\frac{\bar{F}_{0\Sigma n}^t}{\bar{\gamma}_{\Sigma n}^t} \right)^{\frac{1}{g_{0n}+1}}, \quad t = 1, 2, \dots, T. \quad (11)$$

Аналогично можно поставить и решить упрощенную оптимизационную задачу (3) с целевой функцией (7) логарифмического типа:

$$\bar{\Gamma}_{0Rn}^t = \frac{1 - \bar{L}_{P\Sigma}^*}{\sum_{t=1}^T \bar{\Phi}_{0\Sigma n}^t} \frac{\bar{\Phi}_{0\Sigma n}^t}{\bar{\gamma}_{\Sigma n}^t}, \quad t = 1, 2, \dots, T. \quad (12)$$

Подставляя условие $\bar{\Gamma}_{0n}^t = \bar{\Gamma}_{0Rn}^t$ в выражения (4), (6), (7), определяют соответственно рациональные значения $\bar{\Gamma}^i = \bar{\Gamma}_R^i$ полей рассеяния погрешностей КП машины и достигнутый минимальный уровень комбинированной технико-экономической характеристики.

Выражения (11), (12) указывают на пропорциональность между произвольно взятым λ -м и η -м рациональными значениями началь-

ных технологических свойств в n -м варианте технологического процесса изготовления машины. Характеристикой такой пропорциональности является коэффициент $(k)_{m\eta}^\lambda$. Из выражений (11), (12) следует, что

$$\frac{\bar{\Gamma}_{0nR}^\lambda}{\bar{\Gamma}_{0nR}^\eta} = (k)_{m\eta}^\lambda = \begin{cases} \left(\frac{\bar{F}_{0\Sigma n}^\lambda \bar{\gamma}_{\Sigma n}^\eta}{\bar{F}_{0\Sigma n}^\eta \bar{\gamma}_{\Sigma n}^\lambda} \right)^{g_{0n}+1} & \text{— при аппроксимации (6);} \\ \frac{\bar{\Phi}_{0\Sigma n}^\lambda \bar{\gamma}_{\Sigma n}^\eta}{\bar{\Phi}_{0\Sigma n}^\eta \bar{\gamma}_{\Sigma n}^\lambda} & \text{— при аппроксимации (7),} \end{cases} \quad (13)$$

где $\lambda, \eta = 1, 2, \dots, T$ — индексы технологических свойств.

Поскольку решения (11), (12) ориентированы на конкретную конструкцию машины и определенную технологию изготовления, коэффициент $(k)_{m\eta}^\lambda$ можно считать свойством комплексной рациональности точностного облика всей разрабатываемой технической системы, включающей конструкцию изделия, технологию его изготовления и условия ее реализации.

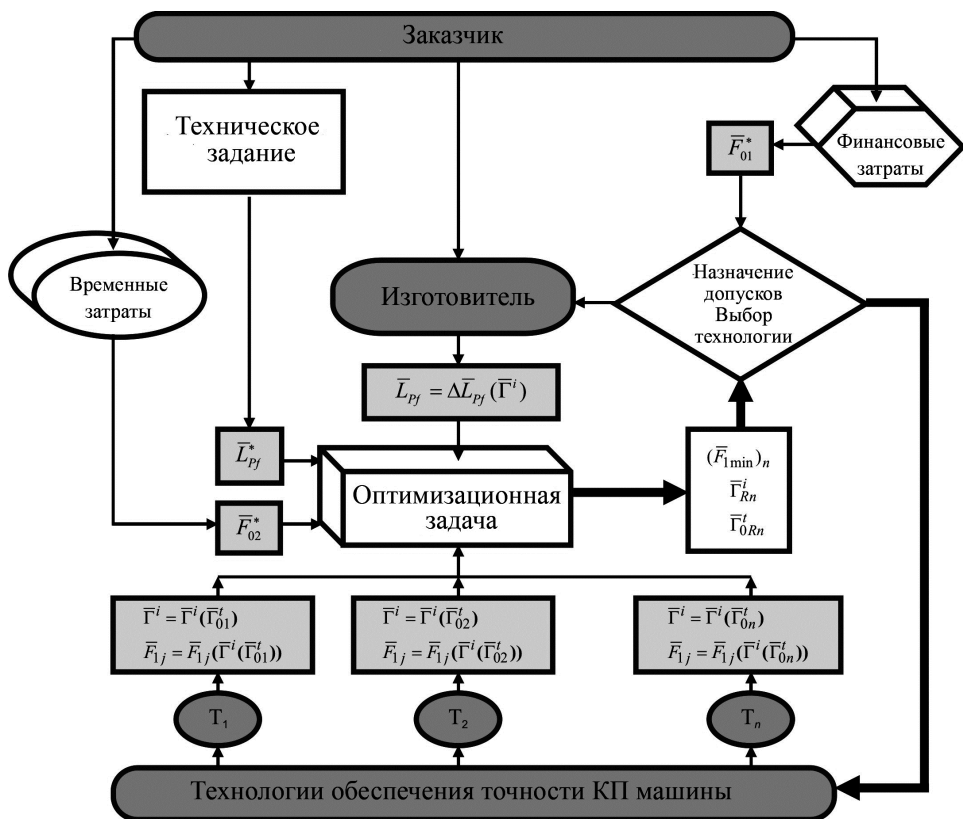
Если переход от опытного к серийному производству машины будет сопровождаться изменением технологических средств обеспечения ее точности, то коэффициенты $(k)_{m\eta}^\lambda$, определяемые зависимостями (13), также будут меняться. Это означает, что принятое технологическое решение не будет рациональным и серийное производство разрабатываемого нового изделия будет сопряжено с дополнительными технико-экономическими затратами. Поэтому конструкторско-технологические решения по назначению и последующей реализации точности КП разрабатываемой машины, принятые без учета требований идентичности технологических средств обеспечения точности в опытном и серийном производстве, априори нерациональны. В связи с этим технологичной следует считать машину, конструкция и технология изготовления которой обеспечивают соблюдение условия

$$(k)_{m\eta}^\lambda = \text{const} \quad (14)$$

при любой серийности производства. Очевидно, что равенство (14) является одним из необходимых условий производственной технологичности разрабатываемого изделия.

На основе оптимизационной задачи (3) и ее упрощенных аналитических решений (11), (12) можно предложить объединенный метод назначения и технологического контроля допусков на КП машины при проектировании (рисунок). В общем случае исходные данные

для реализации метода можно разделить на три группы. В первую группу входят соотношения (1) или их упрощенные аналоги, устанавливающие связь эксплуатационных характеристик машины с точностью ее КП. Вторую группу составляют зависимости (2) и их аналоги (4), отражающие закономерности формирования точности КП машины при изготовлении в группе альтернативных технологий. В третью группу входят выражения (1), (6), (7), характеризующие технико-экономические аспекты достижения точности в рамках данных технологий. Техническим заданием заказчика задаются нижние ограничения \bar{L}_{pf}^* на эксплуатационные характеристики разрабатываемого изделия, а также верхние ограничения \bar{F}_{0j}^* на финансовые и временные затраты по обеспечению точности его КП.



□ Информационное обеспечение оптимизационной задачи

■ Участники процесса объединенного метода назначения и технологического контроля допусков на КП

← Основные связи при реализации объединенного метода

Схема реализации объединенного метода назначения и технологического контроля допусков на КП машины при проектировании конструкции и технологии изготовления

Для каждого n -го варианта альтернативной технологии обеспечения точности машин ($(n=1, 2, \dots, \tilde{N}$, где \tilde{N} — число рассматриваемых альтернативных технологий) решается задача (3) или ее аналоги и определяется минимальный уровень $(\bar{F}_{1\min})_n$ целевой функции. Наилучшим вариантом значений полей рассеяния $\bar{\Gamma}^i$ КП и технологических средств их обеспечения, характеризуемых конкретной технологией и технологическими условиями $\bar{\Gamma}_{0n}^i$ ее реализации, будет вариант, соответствующий наименьшему из \tilde{N} значений $(\bar{F}_{1\min})_n$ целевой функции:

$$\bar{F}_{1\min} = \min\{(\bar{F}_{1\min})_1, (\bar{F}_{1\min})_2, \dots, (\bar{F}_{1\min})_{\tilde{N}}\}.$$

Если анализируемые технологии изготовления машины не удовлетворяют условию $\bar{F}_{1\min} \leq \bar{F}_{01}^*$, то возможны следующие варианты поведения участников процесса создания новых изделий: корректирование ограничивающих параметров \bar{L}_{pf}^* , \bar{F}_{0j}^* ; разработка новых, менее затратных технологических решений по обеспечению точности конструкции машины; создание нового изделия, эксплуатационные характеристики которого менее чувствительны к изменению точности КП.

Выводы. Разработано универсальное математическое обеспечение для реализации совмещенного метода назначения и технологического контроля допусков на КП машин на стадии их проектирования. Математическое обеспечение включает систему обобщенных зависимостей для определения рациональных значений полей рассеяния начальных свойств технологической системы, КП машины и оценки технико-экономических показателей их производства. Сформулировано необходимое условие рациональности точностного облика проектируемых машин, разработаны универсальные математические зависимости для проверки этого условия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология машиностроения: В 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения: Учеб. для вузов / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, А.М. Дальский и др.; Под ред. А.М. Дальского. — 2-е изд., стер. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. — 564 с.
2. Т а р а с о в В.А. Повышение эксплуатационных характеристик машин на базе управления технологической наследственностью // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 1994. — № 4. — С. 68–73.
3. Л у к ь я н о в Б.В. Точность технологических процессов в производстве летательных аппаратов: Конспект лекций по курсу «Спецтехника» для самостоятельной работы студентов. — М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1988. — 36 с.

Статья поступила в редакцию 19.09.2012