

УДК 658.512

М. Е. ПОПОВ, д-р техн. наук, А. М. ПОПОВ, канд. техн. наук (ДГТУ, Ростов-на-Дону)

Определение стоимости изделий на стадии проектирования в интегрированных САПР

Представлен метод определения стоимости изделий на стадии проектирования в интегрированных САПР и моделирования стоимости вариантов конструкторских решений на основе сокращенного нормативного проектирования технологии. Эта методика базируется на предвидении наиболее вероятной технологии изготовления изделий при известной основной конструкторской информации. Результаты расчета достаточно чувствительны на любые изменения, которые могут быть предложены в процессе разработки конструкции.

Method of the products cost determination in integrated CADs at development stage and cost modeling of design solutions variants on a basis of concise standardized technology development is presented. This method is grounded on the most probable production technology forecasting at known principal designing information. Calculation results are rather sensitive to any changes which can be proposed during construction development.

Характерной особенностью задач, возникающих при проектировании конструкций машин, является противоречивость порождаемых ими требований. Наиболее существенное противоречие возникает между требованием обеспечения наименьшей массы и рядом таких требований, как уменьшение стоимости изготовления, повышение выносливости, надежности. В свою очередь, требование уменьшения стоимости изготовления выдвигает определенные требования к технологии изготовления машин и к применяемым конструкционным материалам. В настоящее время, когда уровень технологии позволяет осуществлять различные варианты одной и той же части машины, возникает естественная потребность выбора наиболее рационального конструктивно-технологического решения. Уже на этапе эскизного проектирования машины при выборе конструктивно-технологических решений определенной части машины впервые при проектировании машины приходится решать в комплексе вопросы конструкции и технологии изготовления ее частей.

Современные подходы к интегрированному проектированию опираются на три основных положения, составляющие сущность методологии так называемого СЕ-проектирования [1]:

единовременность, что означает выполнение взаимосвязанных заданий в одно и то же время при максимальном использовании выгодности управления взаимосвязанной деятельностью;

интеграция, что означает связывание процессов через общее управление или отчетную информацию либо управление независимыми заданиями;

предусмотрительность, что означает предвидение последствий проектных решений, принятых на начальном этапе проектирования и интегрированных в общий процесс принятия проектных решений, для всего жизненного цикла изделия.

Очень трудной для предвидения остается стоимость как с точки зрения точности методов ее определения, так и с точки зрения возможности интеграции этих методов в процесс единовременного проектирования. К сожалению, на ранних этапах проектирования машин в настоящее время нет возможности использовать какую-либо методику объективной количественной оценки правильности выбора того или иного решения, кроме методов экспертных оценок.

В работе [2] мы рассмотрели, как на основании многокритериальной оценки вариантов конструкции выбирается наилучшее решение по комплексу технических и экономических критериев. В качестве основного экономического критерия обычно принимается себестоимость, т. е. производственные затраты, хотя желательно учитывать затраты за весь жизненный цикл изделия [1, 3].

При детальном проектировании конструкции и оптимизации ее параметров в качестве критерия также часто используется стоимость. Расчет стоимости необходим также для прогнозирования полной себестоимости и цены изделия. В первом случае достаточно использовать так называемую технологическую себестоимость, т. е. себестоимость с учетом только статей затрат, изменяющихся в сравниваемых вариантах. Во втором случае необходимо с достаточной точностью оценить полную себестоимость. Как в первом, так и во втором случае для расчета может быть выбрана та или иная модель стоимости.

Наиболее точную оценку ожидаемых затрат может дать лишь полная калькуляция себестоимости. Однако

это возможно только при наличии полной и подробной конструкторской и технологической документации на создаваемое изделие, которая на стадии проектирования конструкции еще отсутствует.

Для оценки ожидаемых затрат на ранних стадиях проектирования изделий известны шесть методов и моделей стоимости [3], основанные на:

- экспертной технико-экономической оценке;
- технологических операциях и видах деятельности (работ);
- физических закономерностях;
- корреляционном моделировании;
- конструкторско-технологическом подобии;
- определении массы (доли) материальных затрат в себестоимости продукции.

Однако рассмотренные методы оценки затрат дают низкую точность, что не обеспечивает надежность прогнозов технико-экономической эффективности разработки и постановки новой продукции на производство. И самое главное, данные методы и модели не позволяют интегрировать их в системы автоматизированного проектирования конструкций (САПР).

По степени полноты учета технологии изготовления изделия все модели стоимости можно разбить на три группы (рис. 1):

- а) модели, в которых затраты оцениваются только на основании конструкторской документации (на основе массы, на основе корреляционного моделирования, на основе физических закономерностей);
 - б) модели, в которых затраты оцениваются на основе конструкторской и технологической документации изделия-аналога (на основе конструкторско-технологического подобия);
 - в) модели, в которых затраты оцениваются на основе конструкторской и технологической документации проектируемого изделия (на основе технологических операций и видов деятельности).
- В последнем случае, в свою очередь, могут использоваться различные методы получения моделей технологии и моделей затрат.

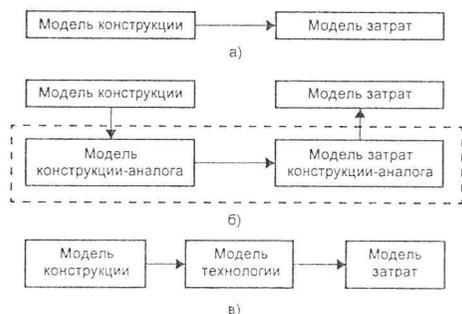


Рис. 1. Классификация моделей затрат по степени полноты учета технологии изготовления изделия

Модели технологии могут быть получены исходя из двух основных подходов к ее проектированию:

- 1) при проектировании на основе унифицированных маршрутно-операционных технологических процессов (типовых и групповых), при этом реализуется принцип "от общего к частному";
- 2) при проектировании на основе синтеза единичных технологических процессов из отдельных унифицированных переходов, при этом реализуется принцип "от частного к общему".

Имея технологию, т. е. перечень видов работ или технологических операций, можно рассчитать затраты на изготовление изделия.

Существуют следующие методы расчета себестоимости (рис. 2):

- 1) бухгалтерский, когда затраты на основные материалы и заработную плату основных рабочих рассчитывают по формулам для данных технологических процессов, а все остальные затраты определяют укрупненно, в процентах от заработной платы (цеховые накладные расходы);
- 2) поэлементный, когда все элементы себестоимости рассчитывают прямым счетом по точным формулам (аналитический метод) или по укрупненным нормативам (нормативный метод).

Основной задачей построения математической модели затрат на производство изделий является определение аналитических зависимостей трудоемкости и себестоимости изготовления от конструктивно-технологических параметров изделия и технико-экономических показателей технологического процесса изготовления изделия.

В данной работе предлагается метод определения ожидаемых затрат на основе интеграции конструкторского и технологического проектирования с использованием методологии Concurrent Engineering [1]. Сущность метода состоит в том, что параллельно с проектированием конструкции осуществляется сокращенное нормативное проектирование технологии и расчет на этой основе ожидаемых материальных и трудовых затрат на изготовление изделия (рис. 3).

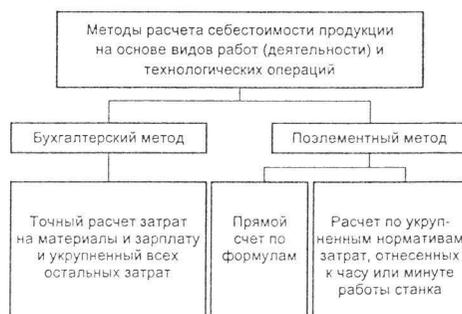


Рис. 2. Методы расчета себестоимости на основе известных видов работ (деятельности) и технологических операций

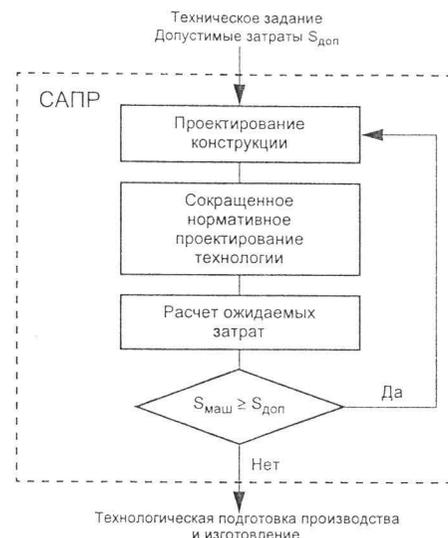


Рис. 3. Сопряжение конструкторских работ с оценкой и контролем затрат

Стоимость машины определяют по формуле

$$S_{\text{маш}} = (S_{N_{\text{дет}}} + S_{\text{ком}} + S_{\text{сб}})(1 + q_{03}),$$

где $S_{N_{\text{дет}}}$ — себестоимость изготовления деталей в собственном производстве; $S_{\text{ком}}$ — стоимость комплектующих покупных деталей и сборочных единиц; $S_{\text{сб}}$ — себестоимость сборки машины; $q_{03} = H_{03}/100$ — коэффициент общецеховых накладных расходов (H_{03} — общецеховские накладные расходы в процентах от основной заработной платы).

Стоимость комплектующих покупных деталей и сборочных единиц определяют по каталогам и ценам фирм-поставщиков.

Для определения затрат на сборку изделие представляется как совокупность определенных спецификацией сборочных единиц и деталей

$$M = \{D_1, D_2, D_3, \dots, D_N\}, \quad i = 1, N,$$

находящихся в определенной конструктивной связи между собой. Эти связи представляют различные виды соединений деталей. Спецификация изделия может быть представлена графом входимости (рис. 4, а), который в свою очередь может быть преобразован в граф технологической последовательности сборки (рис. 4, б), называемой также технологической схемой сборки. Каждой дуге графа технологической последовательности сборки соответствует определенный технологический переход сборки, зависящий от вида соединения, а технологический процесс сборки есть упорядоченное множество сборочных переходов:

$$TP_{\text{сб}} = \{\mu_{1k}, \mu_{2k}, \mu_{3k}, \dots, \mu_{Nk}\},$$

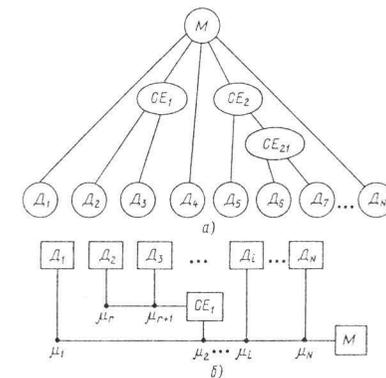


Рис. 4. Схема структуры изделия в соответствии со спецификацией (а) и технологическая схема сборки (б): М — машина; СЕ — сборочная единица; Д — деталь

где μ_{ik} — сборочный переход в соответствии с технологической схемой сборки, $i = \overline{1, N}$; k — вид соединения, обеспечиваемого на i -м технологическом переходе, $k = \overline{1, J}$.

Зная параметры соединяемых поверхностей, можно определить оперативное время по каждому i -му сборочному переходу

$$T_{\text{сб}i} = aX + b,$$

где X — средневзвешенная величина параметра соединяемых деталей, принятого для расчета (длина, диаметр, ширина и пр.); a, b — эмпирические коэффициенты, зависящие от вида соединения, типа производства и массы детали.

Тогда себестоимость сборки изделия может быть определена по формуле

$$S_{\text{сб}} = \psi_{\text{с}} C_{\text{ч.с}}(1 + q_{\text{с}}) \sum_{i=1}^N T_{\text{сб}i},$$

где $\psi_{\text{с}}$ — коэффициент, учитывающий затраты времени на обслуживание и подготовку рабочего места сборщика; $C_{\text{ч.с}}$ — средняя часовая заработная плата рабочих сборщиков; N — число деталей (соединений) в изделии; $q_{\text{с}} = H_{\text{с}}/100$ — коэффициент накладных расходов сборочного цеха ($H_{\text{с}}$ — накладные расходы сборочного цеха в процентах от основной заработной платы).

Для определения затрат на изготовление деталей $S_{N_{\text{дет}}}$ изделия каждая деталь представляется как совокупность отдельных поверхностей и конструктивных элементов (рис. 5):

$$D = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\},$$

связанных между собой определенными размерными связями. Каждой отдельной поверхности детали может

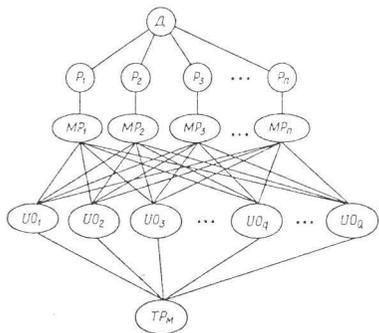


Рис. 5. Структурная схема конструкции детали и технологии ее изготовления

быть поставлен в соответствие определенный план или маршрут ее обработки, зависящий от требований к точности размеров и качеству поверхности конструктивно-го элемента и вида исходной заготовки. Вид исходной заготовки определяется маркой материала детали и серийностью производства. Тогда маршрут обработки i -й поверхности есть множество технологических переходов:

$$MP_i = \{\mu_{i1k}, \mu_{i2k}, \mu_{i3k}, \dots, \mu_{inm}\},$$

где μ_{ij} — метод обработки i -й поверхности детали на j -м переходе ($i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}$); k — вид метода обработки на j -м технологическом переходе ($k = \overline{1, l}$). Таким образом, технологический процесс обработки детали можно представить как множество планов обработки (см. рис. 5):

$$TP_M = \{MP_1, MP_2, MP_3, \dots, MP_n\}$$

или

$$TP_M = \{(\mu_{11k}, \mu_{12k}, \dots), (\mu_{21k}, \mu_{22k}, \dots), (\mu_{n1k}, \mu_{n2k}, \dots)\}.$$

Если сгруппировать множество технологических переходов по видам технологического оборудования, то технологический процесс преобразуется в множество укрупненных (обобщенных) технологических операций [4]:

$$TP_M = \{UO_1, UO_2, UO_3, \dots, UO_Q\},$$

где $UO_q = \{\mu_{ijk}\}$ — укрупненная (обобщенная) технологическая операция, здесь $k = \text{const}$, $q = \overline{1, Q}$.

Для каждого технологического перехода определяют величину расчетного промежуточного припуска на обработку по уравнениям типа [5]:

$$Z_{ij} = a_0 + a_1 D_{ij}^b + a_2 L_{ij}^c,$$

где a_0, a_1, a_2, b, c — эмпирические коэффициенты и показатели, учитывающие влияние габаритных размеров детали и метода обработки на величину операционного

припуска; D_i и L_i — характерные размеры i -й поверхности детали.

Далее определяют расход металла, удаляемого с припуском при обработке детали,

$$g_c = \gamma \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Z_{ij} F_i,$$

где F_i — площадь i -й поверхности детали, подвергающейся механической обработке; γ — плотность материала детали.

Тогда стоимость материала, идущего на изготовление отдельной детали,

$$S_{\text{мат}} = (G + g_c) K_c c_m,$$

где G — масса детали; c_m — стоимость единицы массы материала заготовки детали; K_c — коэффициент, учитывающий расход металла на технологические напуски (штамповочные и литейные уклоны и т. д.).

Принимая за основу значения элементов режимов резания, наиболее часто встречающиеся в производстве, с достаточной точностью можно определить наиболее вероятное машинное время для каждого технологического перехода обработки детали по формуле [6]

$$t_{mij} = a D_{ij}^b L_{ij}^c,$$

где a, b, c — эмпирические коэффициенты; D_{ij}, L_{ij} — характерные размеры i -й поверхности детали.

По каждой укрупненной (обобщенной) операции определяется штучно-калькуляционное время

$$t_{ш.кq} = \psi_k \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{mij},$$

где ψ_k — коэффициент, учитывающий затраты времени на обслуживание и подготовку q -го оборудования к работе.

Отсюда можно определить общую трудоемкость и затраты на заработную плату рабочих станочников при изготовлении отдельной детали машины:

$$S_{\text{зар}} = c_{ч.р} (1 + q_m) \sum_{q=1}^Q t_{ш.кq},$$

где $c_{ч.р}$ — средняя часовая заработная плата рабочего станочника; $q_m = H_M/100$ — коэффициент накладных расходов механического цеха (H_M — накладные расходы механического цеха в процентах от основной заработной платы).

Аналогичным образом рассчитывают расходы, связанные с работой оборудования и инструмента, затрачиваемые на изготовление отдельной детали:

$$S_{\text{об}} = c_{м.ч} M_k \sum_{q=1}^Q t_{ш.кq},$$

где $c_{м.ч}$ — нормативная себестоимость машино-часа базового станка; M_k — машинокоэффициент, зависит от вида станка.

Определив составляющие $S_{\text{мат}}$, $S_{\text{зар}}$ и $S_{\text{об}}$, находим себестоимость изготовления отдельных деталей

$$S_{\text{дет}} = S_{\text{мат}} + S_{\text{зар}} + S_{\text{об}},$$

себестоимость изготовления всех деталей машины

$$S_{N_{\text{дет}}} = \sum_{i=1}^N S_{\text{дет}i}$$

и стоимость $S_{\text{маш}}$ машины в целом.

Полученное прогнозное значение стоимости $S_{\text{маш}}$ машины сравнивается с допустимой предельной себестоимостью $S_{\text{доп}}$ машины:

$$S_{\text{маш}} > S_{\text{доп}}?$$

Если стоимость $S_{\text{маш}}$ машины больше $S_{\text{доп}}$, то необходимо вернуться к этапу конструирования и проанализировать полученные технические решения с целью снижения затрат. Допустимые предельные затраты на изготовление машины находим из условия:

$$S_{\text{доп}} = S_r - R,$$

где S_r — минимальная рыночная цена подобной продукции; R — заданная расчетная норма прибыли предприятия.

Изложенный метод сокращенного нормативного проектирования технологии и определения затрат по вариантам конструкторских решений возможно реализовать при достаточной конструктивной проработке этих вариантов. Метод предполагает прогнозирование наиболее вероятной рациональной технологии изготовления машины по известным сведениям о ее конструкции. Именно такой технологии соответствуют используемые в расчетах нормативы и коэффициенты. Результаты расчета обладают высокой чувствительностью практически к любым усовершенствованиям, которые могут быть предложены в процессе разработки конструкции.

Рассмотрим примеры построения и исследования моделей стоимости изготовления деталей. Для простоты изложения в качестве основы построения моделей используем бухгалтерский метод расчета себестоимости.

Пример 1. Построить математическую модель затрат на изготовление деталей типа гладких втулок (рис. 6). Материал детали — чугун, производство — серийное,

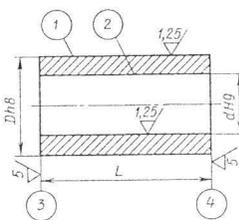


Рис. 6. Деталь типа гладкой втулки

заготовка — литье в кокиль, обработка на универсальных токарных станках.

При расчете бухгалтерским методом себестоимость изготовления детали определяем по формуле

$$S_v = PK_c c_m + c_{ч.р} (1 + q_m) \sum_{q=1}^Q t_{ш.кq},$$

где P — расчетная масса заготовки ($P = G + g_c$); K_c — коэффициент, учитывающий расход металла на технологические напуски (принимаем $K_c = 1$); c_m — стоимость единицы массы материала заготовки; $\sum_{q=1}^Q t_{ш.кq}$ — суммарное штучно-калькуляционное время по всем операциям (переходам); q — число операций (переходов).

При известных размерах детали расчетная масса заготовки может быть определена по формуле

$$P = 0,25\pi\gamma[(D + 2Z_D)^2 - (d - 2Z_d)^2](L + 2Z_L),$$

где Z_D, Z_d, Z_L — общий припуск на обработку поверхности с размерами D, d, L .

Штучно-калькуляционное время на переход определяется по формуле

$$t_{ш.к} = \psi_k t_M,$$

где ψ_k — коэффициент штучно-калькуляционного времени (зависит от вида оборудования); $t_M = K_{us} D d (L)$ — машинное время обработки на технологическом переходе (здесь K_{us} — коэффициент, зависящий от наиболее вероятных режимов резания на рассматриваемом технологическом переходе).

В табл. 1 даны типовые планы обработки поверхностей детали.

С учетом изложенного окончательно получим модель себестоимости изготовления детали:

$$S_v = 0,25\pi\gamma c_m (L + 2Z_L)[(D + 2Z_D)^2 - (d - 2Z_d)^2] + c_{ч.р} (1 + q_m) \psi_k \{(L + 2Z_L)[(d - 2Z_d)^2] \sum_{j=1}^3 K_j + 2K_4(D + 2Z_D)\} + 2K_5[(D + 2Z_D) - (d - 2Z_d)^2],$$

где Z'_d — средний припуск на один переход обработки отверстия.

Таблица 1

| Номер поверхности (см. рис. 6) | Переход (операция) | Коэффициент K_{us} режим резания | Размеры поверхности |
|--------------------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------|
| 1 | 1. Зенкерование | K_1 | d, L |
| | 2. Развертывание черновое | K_2 | d, L |
| | 3. Развертывание чистовое | K_3 | d, L |
| 2 | 1. Черновое точение | K_4 | d, L |
| | 2. Чистовое точение | K_4 | d, L |
| 3 | 1. Подрезание торца | K_5 | D, d |
| | 1. Подрезание торца | K_5 | D, d |

С помощью полученной модели исследуем влияние конструктивных и технологических факторов на себестоимость изготовления гладких втулок с размерами в пределах: $D = 20 \pm 120$ мм; $d = (0 \pm 0,8)D$, мм; $L = (0,5 \pm 10)D$, мм. Будем считать, что в пределах этих размеров общий припуск на обработку и режимы резания будут неизменными.

Тогда для выбранных типовых планов обработки получим: $K_1 = 0,00021$; $K_2 = 0,00044$; $K_3 = 0,000876$; $K_4 = 0,00025$; $K_5 = 0,00033$; $2Z_D = 6$ мм; $2Z_d = 4$ мм; $2Z'_d = 2$ мм; $2Z_L = 6$ мм; $c_M = 1,6$ руб/кг; $c_{пр} = 0,12$ руб/мин; $q_M = 1,6$; $\psi_K = 2,14$; $\gamma = 7,85 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³.

После подстановки исходных данных получим модель себестоимости в функции от конструктивных параметров детали:

$$S_v = 0,0000616(L + 6)[(D + 6)^2 - (d - 4)^2] + 0,001018(d - 2)(L + 6) + 0,000333(D + 6)(L + 6) + 0,000044[(D + 6)^2 - (d - 4)^2].$$

На рис. 7 показан график зависимости себестоимости детали от конструктивных параметров: при $D = 60$ h10 мм, $d = 40$ H9 мм, $L = 50$ мм получим $S_v = 4,79$ руб.

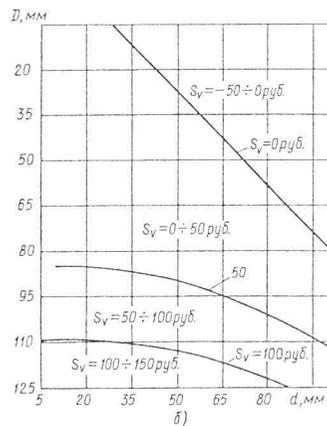
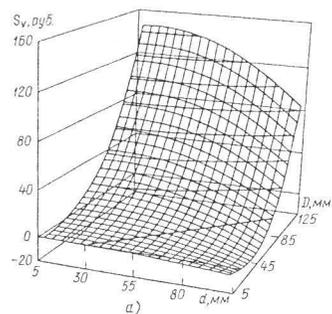


Рис. 7. Зависимость себестоимости изготовления (а) и уровня равной стоимости (б) втулок из стали 45 при $L = D$

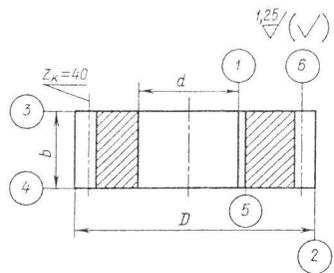


Рис. 8. Деталь типа цилиндрического зубчатого колеса

Пример 2. Построить математическую модель затрат на изготовление деталей типа цилиндрических зубчатых колес (рис. 8). Материал детали — сталь 45, производство — серийное, заготовка — пруток или штамповка, обработка — на универсальных станках. Для поверхностной детали выбраны типовые планы обработки (табл. 2).

Выразив элементы затрат через геометрические параметры зубчатого колеса, получим модель его себестоимости:

$$S_z = 0,25\pi\gamma c_M (b + 2Z_b)[(D + 2Z_D)^2 - (d - 2Z_d)^2] + c_{пр}(1 + q_M)\psi_K \{ (b + 2Z_b) \sum_{j=1}^4 K_j + (D + 2Z_D) \times \sum_{j=5}^6 K_j + K_8 + K_9 Z_k \} + 4K_7 [(D + 2Z_D)^2 - (d - 2Z_d)^2],$$

где Z_k — число зубьев зубчатого колеса.

Для конкретного типоразмера зубчатого колеса с $D = 80$ мм, $d = 40$ мм; $Z_k = 40$, $b = 30$ мм получим

Таблица 2

| Номер поверхности (см. рис. 8) | Переход (операция) | Коэффициент K_{op} режимов резания | Размеры поверхности |
|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------|
| 1 | 1. Сперление | K_1 | d, b |
| | 2. Зенкерование | K_2 | d, b |
| | 3. Развертывание черновое | K_3 | d, b |
| | 4. Развертывание чистовое | K_4 | d, b |
| 2 | 1. Точение черновое | K_5 | D, L |
| | 2. Точение чистовое | K_6 | D, L |
| 3 | 1. Подрезание торца черновое | K_7 | D, d |
| | 2. Подрезание торца чистовое | K_7 | D, d |
| 4 | 1. Подрезание торца черновое | K_7 | D, d |
| | 2. Подрезание торца чистовое | K_7 | D, d |
| 5 | 1. Протягивание шпоночного паза | K_8 | b |
| 6 | 1. Зубофрезерование | K_9 | b, Z |

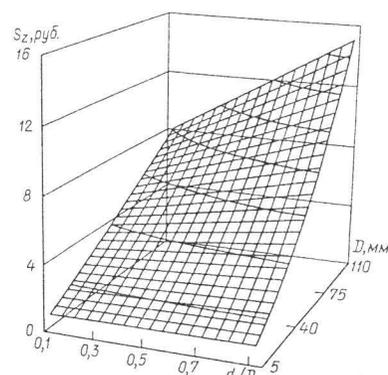


Рис. 9. Зависимость себестоимости детали от конструктивных параметров

$\sum_{j=1}^4 K_j = 0,00208$, $\sum_{j=5}^6 K_j = 0,000167$, $K_7 = 0,000033$, $K_8 = 0,0003$, $K_9 = 0,005$; $c_M = 2,5$ руб/кг, $c_{пр} = 0,12$ руб/мин; $q_M = 2$. Себестоимость детали $S_z = 10,5$ руб. График зависимости себестоимости детали от конструктивных параметров показан на рис. 9.

На рис. 10 представлены результаты расчета стоимости изготовления зубчатых колес ($b = 0,3D$) из различных конструктивных материалов с разным отношением размеров d/D относительно стоимости сплошной детали из стали 45, принятой за начало отчета. Конструкционные материалы расположены в порядке возрастания показателя удельной стоимости материала k_c , определяемого для деталей, работающих на изгиб и кручение, по формуле

$$k_c = c_M \gamma / \sigma^{2/3},$$

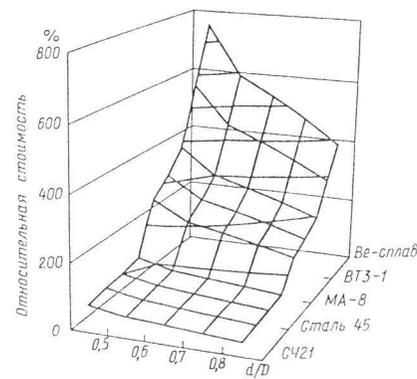


Рис. 10. Относительная стоимость изготовления зубчатых колес из различных материалов

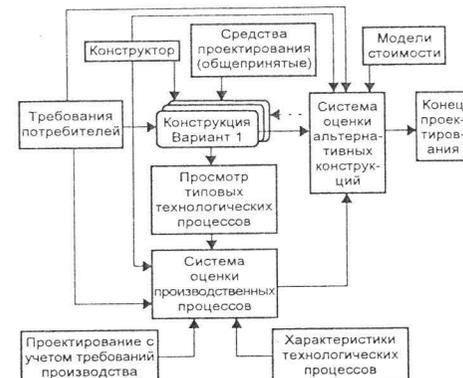


Рис. 11. Схема интегрированного проектирования конструкций на основе моделей стоимости

где σ — разрушающее напряжение для данного вида нагрузки (σ_b — для изгиба и τ_b — для кручения).

Для типовых и комплексных деталей модели затрат должны храниться в базе данных САПР и извлекаться по мере необходимости в процессе проектирования изделия (рис. 11). Для оригинальных деталей синтез модели затрат выполняется на основе сокращенного нормативного проектирования технологии. Аналогичным путем получаем модели затрат на сборку изделия. Изложенный подход был использован при создании виртуальной гибкой системы технической подготовки производства редукторов [4, 7].

Интеллектуальные компьютерные системы управления стоимостью изделия на ранних этапах его проектирования находятся на стыке маркетинговых, финансовых, технологических и технических функций предприятия. Задача подобной системы заключается в оценке стоимости изделия, материальных затрат на его производство и функциональных возможностей в условиях применения различных технологий при его производстве и возможных конструктивных вариантов его исполнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов М. Е., Попов А. М. Интеграция конструкторского и технологического проектирования на основе концепции Concurrent Engineering // Вестник машиностроения. 1998. № 4. С. 41—45.
2. Попов М. Е., Попов А. М. Разработка и постановка продукции на производство на основе структурирования функции качества // Вестник машиностроения. 2000. № 7. С. 52—58.
3. Popow A. Modelowanie kosztow w procesach projektowania wspolbiez nego maszyn. Praca doktorska. Politechnika Poznan'ska. 1999.
4. Попов М. Е., Попов А. М., Сиротенко О. О. Интеллектуальная система автоматизации проектирования технологии изготовления зубчатых колес // СТИИ. 1999. № 3. С. 7—11.
5. Иващенко И. А. Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации. М.: Машиностроение. 1975. 224 с.
6. Картавов С. А. Технология машиностроения (специальная часть). Киев: Вища школа. 1984. 272 с.
7. Попов М. Е., Попов А. М., Попов С. В. Виртуальная гибкая система технической подготовки производства редукторов // СТИИ. 2000. № 8. С. 7—12.