

# Формализация задачи проектирования технологических процессов обработки деталей на станках с ЧПУ

В.Д. Костюков,  
 еед. н. с., к.т.н.,  
 ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, zavod-hrunichev@mail.ru, г. Москва

Представлены результаты научно-исследовательских работ по формализации проектирования станочных операций

Как показал анализ, операционный технологический процесс обработки детали на станке с ЧПУ характеризуется набором характеристик и структурой:  $\theta = \{A_0, S_0\}$ . Проектирование операционного технологического процесса, в большинстве случаев, ведут с учетом конкретных производственных условий ( $Y_n$ ). Предполагается, что заранее известны (расчитаны с помощью других подсистем АСТПП) такие характеристики технологической операции как номер цеха, модель оборудования, шифр оснастки, шифр или исполнительные размеры режущего инструмента, шифры вспомогательного и измерительного инструментов, номер детали, марка материала, его физико-механические свойства, вид охлаждения, величина партии запуска, подготовительно-заключительное время и разряд работ:  $Y_n = \{N_0, ст, осн, рн, ми, \partial N_0, м, фм, охл, п, тпз, р\}$ . Тогда характеристику операционного технологического процесса можно выразить в виде:

$$\theta = Y_n\{t_{um}, S_0\}$$

Как было показано при анализе структур технологических операций различных классов, структурная формула операций 6-го класса является общей для всех классов. Учитывая это, получаем:  $\theta = Y_n\{t_{um}, UK_i^*\}$ . Переход, связанный с установкой и снятием детали в приспособлении, целиком зависит от шифра оснастки. Можно считать, что он также относится к условиям производства:  $\theta = Y_n\{t_{um}, K_i^*\}$ . Системный анализ показал, что структуру операции можно представить в виде последовательности различных переходов:  $K^* = \theta_1 \theta_2 \dots \theta_i$ . Каждый из этих переходов, в свою очередь, определяется набором характеристик и структурой.

Рассмотрим подробно задачу определения оптимальной последовательности этапов процесса обработки деталей на металлорежущих станках с ЧПУ. В качестве критерия оптимальности можно принять величину суммарных затрат на изготовление детали при выполнении технико-экономических ограничений.

Процесс обработки деталей на станке представим в виде последовательности элементов технологии (переходов, которые, в свою очередь, могут состоять из рабочих и вспомогательных ходов инструмента). Процесс обработки можно представить в виде кортежа или строки символов:  $\theta = (\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n)$ ,  $\theta = (\theta_{1j}, \theta_{2j} \dots \theta_{nj})$ ,

где:  $\theta$  – технологическая станочная операция;

$\theta_i$  –  $i$ -тый технологический переход ( $i=1, n$ );

$\theta_{ij}$  –  $j$ -тый ход инструмента в  $i$ -том переходе ( $j=1, m$ );

$m$  – число ходов в  $i$ -том переходе;

$n$  – общее число переходов в данной операции.

По аналогии можно продолжить разбиение процесса на составляющие элементы, однако ограничимся рассмотрением технологического процесса на уровне ходов. То есть инструментальный ход будем рассматривать как наименьшую структурную единицу многоэтапного дискретного технологического процесса.

Набор значений переменных, описывающих размеры и форму детали, состояние обрабатываемых поверхностей, а также материал детали определим как состояние детали. Все возможные в процессе обработки состояния детали образуют пространство состояний детали, которое обозначим  $I_1(VC_i, I_1)$ .

Набор значений параметров состояния технологического оборудования, на котором может вестись обработка данной детали, представим как пространство состояния оборудования и обозначим  $I_2$ .

Аналогично введем пространство состояния инструментов и оснастки и обозначим их соответственно  $I_3$  и  $I_4$ .

Пространства  $I_i$  заданы над полем  $P$  вещественных чисел. Тогда можно ввести пространство технологической системы, как суммы пространств  $I_i$ :

$$I = I_1 \oplus I_2 \oplus I_3 \oplus I_4 \quad I_{(j)} \subseteq I$$

Ясно, что размерность подпространства  $I_i$  меньше размерности пространства

$$I: \dim I_{(j)} \leq \dim I$$

Вектор  $C = (C_1, C_2, \dots, C_s)$  характеризует локальное состояние технологической системы после применения какого-либо оператора (элемента технологии) к начальному состоянию. Два состояния технологической системы  $C_1$  и  $C_2$  различны, если хотя бы один параметр, одно свойство (или один элемент в описании) в этих состояниях имеют различные значения:

$$C^{(1)} = (C_1, C_2, \dots, C_i^{(1)}, \dots, C_s)$$

$$C^{(2)} = (C_1, C_2, \dots, C_i^{(2)}, \dots, C_s)$$

$$C_i^{(1)} \neq C_i^{(2)}$$

Обозначим  $C^{(0)}$  – начальное состояние технологической системы  $C^{(j)}$  – конечное (целевое состояние), а  $C_{ij}$  – состояние технологической системы получаемое в результате выполнения  $j$ -го хода  $i$ -го перехода. Очевидно, что  $C_{ij}$  являются переменными, принимающими значения из множества  $I$ , т.е.  $\forall C_{ij} \subseteq I$

Множество технологических переходов, допустимых при использовании данной операции, обозначим  $\mathcal{W}$ . Оно определяет технологические возможности и характеристики оборудования, технологического оснащения и другие условия. Технологические операции  $\theta$ , переходы  $\theta_i$  и инструментальные хода  $\theta_{ij}$  будем рассматривать как элементы этого множества  $\forall \theta \forall \theta_i \forall \theta_{ij} \subseteq \mathcal{W}$

В то же время технологические операции и переходы будем рассматривать как отображения в пространстве  $\mathcal{I}$ . Обозначив результат отображения  $\varphi: \mathcal{W} \rightarrow \mathcal{I}$  через  $\theta \in \mathcal{C}$  получим:

$$\theta_i C_{i-1} = C_i$$

$$\theta_{i+1} C_i \Leftrightarrow \theta_{i+1} (\theta_i C_{i-1}) = C_{i+1}$$

$$\theta C^{(0)} \Leftrightarrow \theta_n (\theta_{n-1} (\dots \theta_1 C^{(0)})) = C^*$$

Таким образом для любого элемента технологии  $\theta$  найдется его образ в пространстве  $\mathcal{I}$  – вектор  $\mathcal{C}$ , принадлежащий множеству  $\mathcal{I}$  и характеризующий определенное состояние технологической системы  $\mathcal{W}$ :

$$\forall \theta \subseteq \mathcal{W} \Rightarrow \exists \mathcal{C} \subseteq \mathcal{I}$$

Введём в рассматриваемое множество технологий  $R$ , которое определим как декартово произведение множеств  $\mathcal{I}$  и  $\mathcal{W}$ :

$$R = \mathcal{I} \times \mathcal{W}$$

И на этом множестве с элементами  $(\theta, \mathcal{C}) \in R$  зададим целевую функцию  $F(\theta, \mathcal{C})$ , характеризующую качество технологической станочной операции  $\theta$ . В конкретном случае  $F(\theta, \mathcal{C})$  может характеризовать величину суммарных затрат на изготовление детали. Функция  $F(\theta, \mathcal{C})$  по построению обладает свойством сепарабельности, т.е.:

$$F(\theta, \mathcal{C}) = \sum_{i=1}^n f_i(\theta_i, C_i)$$

При проектировании оптимальных технологических операций в качестве исходных данных необходимо задавать значения исходных  $C^{(0)}$  и конечных  $C^*$  состояний, а решением задачи будет  $\theta^*$  набор элементов технологии, осуществляющих преобразование технологической системы  $\mathcal{W}$  из исходного состояния в целевое  $C^* = \theta^* C^{(0)}$ , которое выбирается из множества технологических операций  $R$  с учетом целевой функции  $F(\theta, \mathcal{C})$

Таким образом условие оптимальности технологической операции  $\theta^*$  можно сформулировать в виде:

$$F(\theta^*, \mathcal{C}) = \inf_{\theta \in R} F(\theta, \mathcal{C}), \theta^* \in R \ \& \ C^* = \theta^* C^{(0)}$$

На практике при проектировании технологических процессов обработки деталей на станках с ЧПУ эту задачу будем решать по частям, выделяя частные задачи оптимизации со своими критериями эффективности и ограничениями.

Для проектирования технологической операции оптимальной структуры и выделения на её основе элементов технологии для более детальной проработки используем разбиение множества технологий  $R$  на непересекающиеся классы. Разбиением множества технологий  $R$  будем называть, как это принято, такое множество его элементов  $R = \{R_i\}$ , ( $i \in I$ , где  $I$  – некоторое множество индексов  $i$ ), для которого справедливо  $R_i \subset R$  при всех  $V_i \in I$ ,  $R_i \neq \emptyset$  при всех  $V_i \in I$ ,  $R_i \cap R_j = \emptyset$  при  $i \neq j$ ,  $\cup_{i \in I} R_i = R$

Пренебрегая для простоты рассуждений разделением на более мелкие элементы, будем рассматривать отдельную технологическую операцию как последовательность переходов:

$$\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$$

$$C_i = \theta_i (\theta_{i-1} (\dots \theta_1 C^{(0)}))$$

где  $\theta_i$  –  $i$ -тый технологический переход в операции  $\theta$ ;

$C_i$  – состояние технологической системы после  $i$ -того перехода.

При проектировании технологической операции изготовления деталей на станке с ЧПУ вначале встает вопрос о формировании множеств  $\mathcal{I}$  и  $\mathcal{W}$ . Эти множества должны определяться в результате выбора элементов из общей базы данных системы ТПП предприятия. При формировании допустимых (массивов) множеств  $\mathcal{W}$ ,  $\mathcal{I}$ ,  $R$  и выражения для критерия оптимальности  $F(\theta, \mathcal{C})$  необходимо использовать соответствующую нормативно-справочную технологическую информацию (оборудование, оснащение, инструмент, обрабатываемые материалы и т.п.).

Затем для выбора оптимальной структуры операционного технологического процесса необходимо задать конечное разбиение множества технологий  $R$  и целевую функцию  $F(\theta, \mathcal{C})$ , определенную на этом множестве. После чего на ЭВМ может быть решена оптимизационная задача большой размерности.

Обозначим через  $\varphi_1$  отображение, устанавливающее соответствие между элементами конечного разбиения  $\{R_i\}$ ,  $C_i \in \mathcal{I}$ ,  $i \in I$  и элементами конечного разбиения:

$$\{\mathcal{W}\}, \varphi_1: \mathcal{W} \rightarrow \mathcal{I}.$$

Затем определяем граф  $G$  – элементных процессов, осуществляемых в данной технологической системе. Граф  $G$  определяется множеством вершин  $\mathcal{W} = \{\mathcal{W}_i\}$ ,  $i \in I$  и отображением  $\varphi_2: \mathcal{W} \rightarrow \mathcal{W}$ . Вершинам этого графа соответствуют элементы разбиения  $\mathcal{W}$  (подмножества состояний технологической системы.), а дугам – элементы допустимого технологического процесса. Любой путь на данном графе  $L_g(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)$ , приводящий из вершины  $C^0$  в вершину  $C^*$ , соответствует допустимой структуре операционного технологического процесса.

По значениям целевой функции  $F(\theta, C)$  можно оценить величину затрат на выполнение каждого элемента технологии, т.е. можно дать оценку  $\varphi_1(\theta_i, C)$  для каждой дуги  $\theta_i$  графа  $G$ . Оптимальный технологический процесс должен иметь такую структуру, которой соответствует путь  $L(\theta^*)$ , приводящий из вершины  $C^0$  в вершину  $C^*$  с минимальными затратами:

$$\min \sum_{i=1}^n \varphi_1(\theta_i, C), \theta_i \in R$$

Сформированная задача о выборе оптимальной последовательности элементов технологии сводится, таким образом, к определению кратчайшего пути на графе и может быть решена методами оптимизации на графах.

На следующих этапах проектирования требуется найти оптимальные значения параметров технологических переходов, т.е. найти значения переменных  $\theta_i, C_i, i=\overline{1, n}$  при условии, что структура технологической операции является заданной. Здесь в качестве исходных данных необходимо использовать результаты предыдущего этапа проектирования  $\theta^* = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$

Для подробного описания технологических переходов  $(\theta, C)$  введем новое разбиение множества технологий  $\mathcal{W}_z = (W_i)$  и множества состояний технологической системы  $\mathcal{I}_z = \{V_i\}$ . Значения переменных  $\theta, C$  будем выбирать из множества  $\mathcal{W}_z$  и  $\mathcal{I}_z$  соответственно, причем:

$$\forall \theta_i \in \{W_i\}, \forall C_i \in \{V_i\}$$

Рассмотрим два случая, которые могут иметь место при оптимизации параметров отдельного перехода:

- 1) Подмножество  $V_i$  однозначно определяет состояние технологической системы  $C_i$  во множестве  $\mathcal{I}_z$  (т.е.  $V_i$  состоит из одного элемента множества  $\mathcal{I}_z$ );
- 2) Подмножество  $V_i$  не определяет однозначно всех состояний  $C_i, i=\overline{1, n}$  во множестве  $\mathcal{I}_z$  (т.е.  $V_i$  содержит более одного элемента,  $V_i \in \mathcal{I}_z$ ).

В первом случае оптимальные параметры можно рассчитывать для каждого перехода в отдельности. Действительно для каждой переменной  $\theta_i$  имеем:

$$\theta_i \in \{W_i\} = \{\theta: \theta \in W_i \& C_i = C_{i-1}\}$$

причем  $W_i, V_{i-1}, V_i$  заданы в виде исходных данных и не зависят от  $C_j (j \neq i)$ . Оптимальным будет технологический переход  $\theta_i^*$ , удовлетворяющий условию:  $F(\theta_i^*) = \inf\{F(\theta): \theta \in \mathcal{W}_z\}$

Данные выражения описывают задачу выбора оптимальных параметров операционного технологического процесса в форме общей задачи математического программирования. В частности, к такой задаче сводится расчет оптимальных режимов работы технологического оборудования.

Во втором случае оптимальные параметры различных технологических переходов взаимосвязаны, т.е. параметры последующего перехода принимают свои значения в зависимости от значений параметров предыдущего перехода. К задачам подобного типа относятся расчеты межоперационных припусков при обработке различных поверхностей детали и расчеты режимов обработки одной поверхности детали при нескольких различных ходах.

Пусть на множестве  $R = W_i \times V_i \times V_{i+1}$  определена целевая функция:

$$F(\theta, C_i, C_{i+1}) = \min\{F(\theta): \theta \in \mathcal{W}_z \& C_{i+1} = \theta C_i\}$$

И пусть минимальное значение  $F(\theta, C_i, C_{i+1})$  (минимальные затраты на переход  $\theta$ ) достигаются при оптимальных параметрах  $\theta \in \mathcal{W}_z (C_{i+1} = \theta C_i)$ . Тогда минимальные затраты на выполнение операционного технологического процесса с выбранной оптимальной структурой  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$  (т.е. процесса, переводящего технологическую систему из исходного состояния  $C^0$  последовательно в состояния  $C^1, C^2, \dots, C^n$ ) можно определить по формуле:

$$F(\theta, C) = \sum_{i=1}^n F(\theta_i, C_{i-1}, C_i)$$

Таким образом, спроектировать оптимальный операционный технологический процесс – это значит не только найти оптимальную его структуру, но и найти оптимальные параметры  $\theta_i, C_i, i = \overline{1, n}$ , минимизирующие функцию суммарных затрат  $F(\theta, C)$ . Используя свойство сепарабельности функции  $F(\theta, C)$ , для решения этой задачи можно применить методы динамического программирования.

Из этого выражения следует, что минимальные затраты на выполнение операционного технологического процесса достигаются при условии, что каждый переход и ход инструмента выполняются оптимальным. Таким образом показано, что проектирование операционной технологии можно разделить на этапы, выделив частные задачи и сформулировав подпроблемы и частные цели. Такими частными задачами являются расчеты отдельных геометрических параметров, характеризующих состояние обрабатываемой поверхности, расчеты технологических параметров переходов, проектирование типовых инструментальных ходов, типовых переходов, комплексов типовых переходов. Для описания этих типовых задач необходимо разработать и ввести в сценарии работы с постпроцессорами для подготовки управляющих программ к станкам с ЧПУ ряд новых диалоговых окон.