ЛИТЕРАТУРА

1. Королев А.В. Исследование технологии бокового выдавливания при изготовлении колец / А.В. Королев, В.А. Мелентьев // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2007. №2 (24). Вып. 1. С. 41-45.

2. Королев А.В. Расчет усилий деформации при обработке металлических кольцевых заготовок в холодном состоянии / А.В. Королев, В.А. Мелентьев, А.А. Никифоров // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2008. №4 (36). С. 36-39.

3. Королев А.В. Специфика процесса комбинированного дорнования кольцевых деталей с утолщением / А.В. Королев, В.А. Мелентьев // Исследования сложных технологических систем: сб. науч. тр. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2008. С. 60-62.

4. Штамповка кольцевых заготовок / Д.С. Львов, Ю.Л. Рождественский, А.В. Абрамов, Л.К. Литвак. М.: Гостехиздат, 1958. 182 с.

5. Монченко В.П. Эффективная технология производства полых цилиндров / В.П. Монченко. М.: Машиностроение, 1980. 248 с.

Мелентьев Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета

Melentyev Vladimir Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of «Designing technical and technological complex» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 20.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011

УДК 621.7:658.12

С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарёв

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ В УСЛОВИЯХ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рассматривается модель подсистемы проектирования технологических операций фрезерной обработки. Представлены методики формирования рациональных комплектов режущего инструмента и генерации возможных последовательностей обработки при проектировании операций фрезерной обработки в системе планирования многономенклатурных технологических процессов.

Автоматизация проектирования, фрезерная обработка, многономенклатурное производство

S.G. Mitin, P.Yu. Bochkarev

AUTOMATION OF DESIGNING OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS OF MILLING PROCESSING IN THE CONDITIONS OF MULTINOMENCLATURE MANUFACTURING

The model of a designing subsystem of technological operations of milling processing is considered. The technique of formation of rational complete sets of the cutting tool and a technique

of generation of possible sequences of processing are presented at designing of operations of milling processing in system of planning of multinomenclature technological processes.

CAD/CAM, milling processing, multinomenclature manufacturing

На современном этапе развития машиностроительного производства эффективность работы предприятий напрямую зависит от их гибкости в плане постоянного изменения номенклатуры изготавливаемых изделий в соответствии с потребностями рынка. При многономенклатурном характере производства на первый план выходит задача сокращения сроков технологической подготовки производства, которая может быть решена только путём автоматизации различных этапов проектирования технологических процессов. Применение существующих автоматизированных систем технологической подготовки производства является недостаточно эффективным в условиях многономенклатурного производства, так как реализованные в этих системах методики не позволяют учитывать конструкторско-технологические особенности номенклатуры изделий и оперативно реагировать на изменяющуюся производственную ситуацию. В связи с этим одним из основных направлений технологии машиностроения как науки является задача создания новых методик проектирования технологических операций механической обработки деталей с целью более глубокой формализации проектных действий и учёта особенностей конкретной производственной системы. В наибольшей степени поставленные выше задачи нашли свое решение в системе планирования многономенклатурных технологических процессов [1-3].

Теоретические основы разработки технологических операций изложены в [1, 2], где предлагается общая последовательность проектирования операционных технологических процессов в условиях многономенклатурного производства. В соответствии с этой последовательностью разработана модель автоматизированной подсистемы проектирования технологических операций фрезерной обработки, позволяющая отразить последовательность проектирования и информационные связи между этапами проектирования (рис. 1).

Подсистема проектирования технологических операций фрезерной обработки состоит из трёх блоков: выбор средств технологического оснащения, выбор структур технологических операций и разработка технологических переходов. Общие исходные данные для каждого блока находятся в базах данных: по технологическим возможностям оборудования, технологической оснастки, деталей и заготовок, ранее принятых технических решений. Каждый блок состоит из трёх модулей: генерация возможных вариантов, отсев вариантов, выбор рациональных вариантов. После этапов генерации возможных вариантов данные сохраняются в соответствующих фрагментах базы данных технологических операций для оборудования фрезерной группы, откуда впоследствии могут быть оперативно получены при изменении производственной ситуации.

Рациональные варианты, сформированные на каждом предшествующем блоке, поступают на вход каждого последующего блока. После окончания работы второго и третьего блоков производится проверка возможности реализации операции с данными вариантами технологической оснастки, структур операций и режимами обработки. Если в сложившихся производственных условиях реализация невозможна, то проектирование операции возвращается к предыдущему блоку с указанием вновь возникших ограничений.

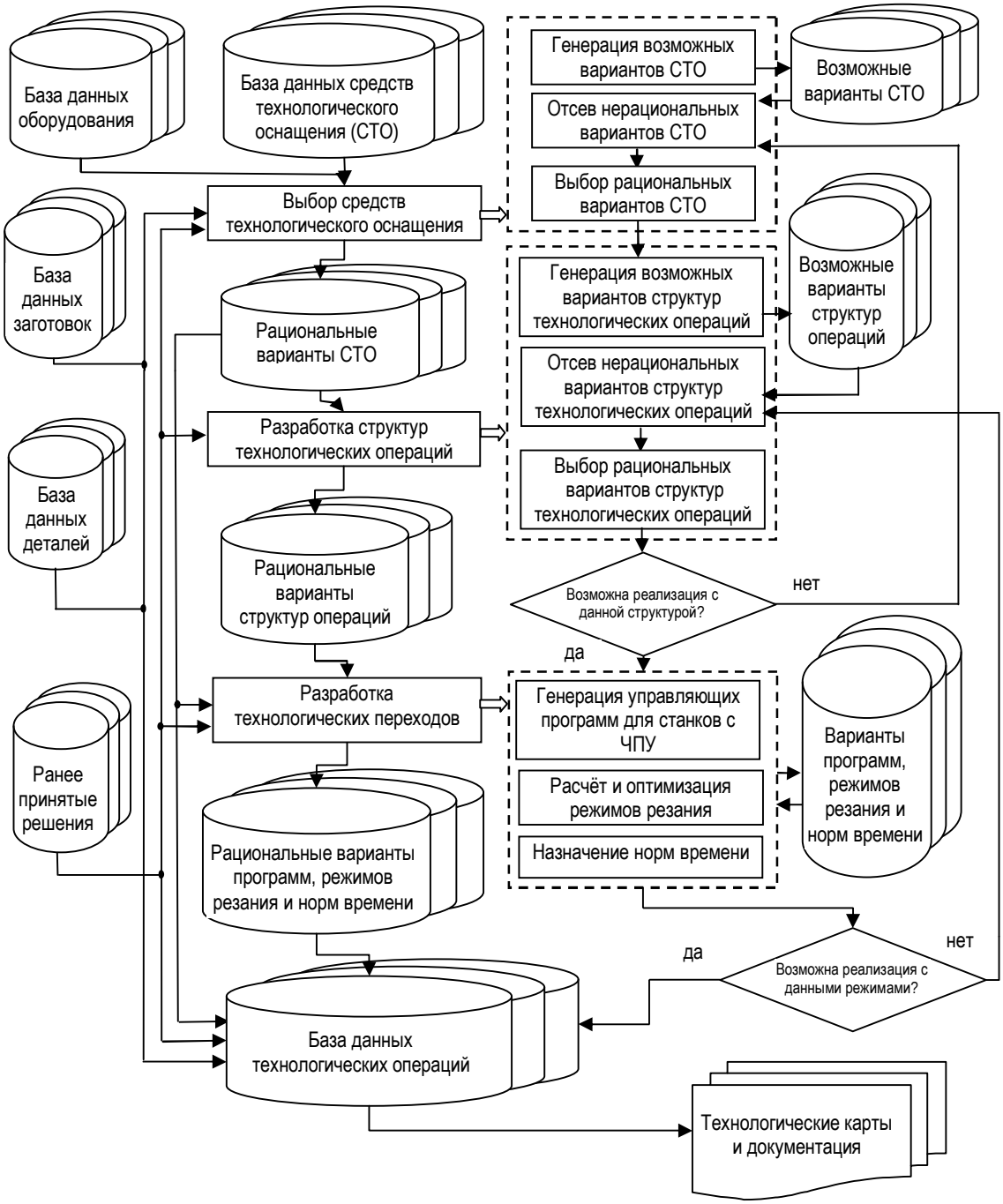


Рис. 1. Модель подсистемы проектирования технологических операций фрезерной обработки

Разработанные варианты операций сохраняются в соответствующей базе данных, и формируется комплект технологической документации в виде операционных карт, карт эскизов и другой необходимой документации.Выбор возможных вариантов технологической оснастки для оборудования фрезерной группы производится на основе базы данных технологической оснастки, структура которой позволяет реализовать методику генерации возможных вариантов оснастки в автоматическом режиме.

Генерация возможных вариантов режущего инструмента представляет собой перебор множества типоразмеров режущего инструмента и установление возможности их применения на каждом переходе. Ввиду большого числа вариантов перебора генерация возможных вариантов режущего инструмента должна происходить поэтапно. На первых этапах устанав-

ливаются такие параметры, которые позволят отсекать из всего множества режущего инструмента как можно большее количество различных типоразмеров режущего инструмента. В результате разработана следующая последовательность генерации возможных вариантов режущего инструмента: выбор по группе оборудования, выбор по присоединительным параметрам инструмента и станка, выбор с учётом твёрдости обрабатываемой поверхности, с учётом материала обработки, выбор в соответствии с типом элементарной поверхности, выбор с учётом точности обработки и выбор в соответствии с размерами обрабатываемой поверхности [4].

Задача выбора из сформированных вариантов технологической оснастки рациональной номенклатуры технологической оснастки для каждого вида оборудования, используемого в производственной системе, на основе известных методов требует больших затрат времени, так как предусматривает полный перебор всех возможных вариантов с расчётом для каждого варианта трудоёмкости наладки и основного времени обработки. В связи с этим предлагается решать эту задачу в два этапа: отсев нерациональных вариантов и формирование рационального комплекта технологической оснастки.

Наиболее эффективным для решения задачи отсева нерациональных вариантов оснастки видится применение критерия однородности технологической оснастки и инструмента, который обеспечивает инвариантность структур операций и позволяет выполнить требование взаимозаменяемости различных элементов технологических операций.

Выбор рационального комплекта режущего инструмента для всей совокупности технологических переходов может быть осуществлён путём перебора различных вариантов режущего инструмента, поступивших после этапа отсева нерациональных вариантов, с расчётом основного времени для каждого варианта. В связи с тем, что таких комбинаций может быть достаточно много, и для их перебора потребуются слишком большие вычислительные ресурсы, необходимо разработать математическую модель, которая позволит сократить объём вычислений и временные затраты на реализацию данной проектной процедуры.

Представим совокупность всех разрабатываемых технологических операций как систему, элементами которой являются отдельные технологические переходы. Обозначим множество технологических переходов $P=\{P_1, P_2, \ldots, P_i, \ldots, P_n\}$, где n – количество различных технологических переходов для всех технологических операций, а множество возможных вариантов режущего инструмента $R=\{R_1, R_2, \ldots, R_j, \ldots, R_m\}$, где m – количество различных типоразмеров режущих инструментов. Требуется для каждого технологического перехода P_i подобрать вариант режущего инструмента R_j, чтобы сформированный комплект режущего инструмента был наиболее рациональным для складывающихся производственных условий.

Сформулируем задачу выбора рациональных вариантов режущего инструмента в терминах динамического программирования. Процедура выбора рациональных вариантов режущих инструментов представляет собой некоторую *операцию*, состоящую из ряда последовательных этапов или шагов. В нашем случае каждый шаг – это отдельный технологический переход.

Пусть шаговые управления $x_1, x_2, \ldots, x_i, \ldots, x_n$ – решения по выбору какого-либо типоразмера режущего инструмента для обработки на i-м шаге (технологическом переходе), где $i=1..n$; n – количество технологических переходов. При этом выигрыш при i-м шаговом управлении равен w_i. Управление *операцией* x – совокупность шаговых управлений. $x=\{x_1, x_2, \ldots, x_i, \ldots, x_n\}$.

Требуется найти такое управление x^*, при котором суммарный выигрыш W обращается в максимум:

$$W = \sum_{i=1}^{m} w_i \rightarrow \max . \qquad (1)$$

При этом $x^*=\{x^*_1, x^*_2, \ldots, x^*_i, \ldots, x^*_n\}$ – оптимальное управление, состоящее из совокупности оптимальных шаговых управлений.

Определим параметры, которые характеризуют состояние системы перед каждым шагом и критерий оптимизации.

От выбора того или иного варианта режущего инструмента зависят режимы резания, на основе которых рассчитывается основное время t_o, поэтому в качестве критерия оптимизации выбираем суммарное основное время $t_{o\Sigma}$, которое определяется суммой основных времён каждого технологического перехода для всех рассматриваемых технологических операций. Требуется подобрать такие комбинации режущего инструмента для каждого технологического перехода, чтобы суммарное время $t_{o\Sigma}$ было минимальным. Если стремиться минимизировать только t_o, то в рамках одной и той же технологической операции может потребоваться смена режущего инструмента, что повлечёт за собой дополнительные затраты времени, сопоставимые с основным временем. В связи с этим ещё одним критерием оптимизации технологической операции является количество смен режущего инструмента, которое должно быть сведено к минимуму.

В условиях многономенклатурного производства, когда размеры партий изготавливаемых деталей невелики, а номенклатура деталей, напротив, довольно широка, потери времени на переустановку режущего инструмента во время переналадки на следующую технологическую операцию, выполняемую на том же станке, что и предыдущая, могут быть достаточно большими. Поэтому необходимо стремиться к сокращению количества смен инструмента в рамках не только одной технологической операции, но и обработки технологических переходов, входящих в различные технологические операции, но выполняемые на одном и том же технологическом оборудовании.

Одним из важнейших технологических параметров режущего инструмента является его стойкость. Время бессменной работы t_{oj} для j-го режущего инструмента ограничивается нормативным периодом стойкости T_j.

$$t_{oj} = \sum_{r=1}^{p} (t_{oj})_r \cdot N_r \le T_j , \tag{2}$$

где p – количество различных деталей, для обработки которых используется j-й инструмент; N_r – размер партии r-й детали.

Управление $x_i=\{j, t_{ij}, a_{ij}\}$ на i-м шаге означает, что на данном технологическом переходе обработка ведётся с помощью j-го типоразмера режущего инструмента с временем обработки t_{ij}, с количеством смен инструмента a_{ij}.

$$a_{ij} = \left\lceil \frac{t_{ij}}{T_j} \right\rceil - 1, \tag{3}$$

где τ_{ij} – суммарное время бессменной работы j-го режущего инструмента после обработки на i-м переходе; обозначение $\lceil\ \rceil$ – ближайшее большее целое число.

$$t_{ij} = t_{(i-1)j} + t_{ij} \cdot N_r . \tag{4}$$

Состояние системы на каждом i-м шаге характеризуется вектором $S_i=\{j, \tau_{ij}\}$, который означает, что перед выполнением i-го перехода использовался j-й типоразмер режущего инструмента, и его использованный ресурс равен τ_{ij}.

Запишем функцию выигрыша для каждого шага

$$w_i = f_i(S_i, x_i) . \tag{5}$$

Определим функцию изменения состояния системы

$$S' = j_i(S_i, x_i), \tag{6}$$

которая показывает, как меняется состояние S_i под влиянием управления x_i.

Тогда имеем возможность записать основное рекуррентное уравнение динамического программирования

$$W_i(S_i) = \max_{x_i}\{f_i(S_i, x_i) + W_{i+1}(j_i(S_i, x_i))\}, \tag{7}$$

которое выражает условный оптимальный выигрыш $W_i(S_i)$ (начиная с i-го шага и до конца) через уже известную функцию $W_{i+1}(S')$. Этому выигрышу соответствует условное оптимальное управление на i-м шаге $x_i(S_i)$.

Решение задачи начинается с проведения условной оптимизации последнего n-го шага, вычисляя для возможных вариантов режущего инструмента на этом шаге условный оптимальный выигрыш

$$W_n(S_n) = \max_{x_n}\{f_n(S_n, x_n)\}, \tag{8}$$

и находя условное оптимальное управление $x_n(S_n)$.

В нашем случае в качестве последнего шага определяется технологический переход, на котором может быть использовано наименьшее количество различных наименований и типоразмеров режущего инструмента, так как в противном случае не гарантируется выполнение данного перехода ввиду существующей вероятности исключения подходящих режущего инструмента на предшествующих шагах.

Далее проводится условная оптимизация (n-1)-го, (n-2)-го и т. д. шагов по формуле (7). В итоге остаётся произвести безусловную оптимизацию управления, учитывая полученные рекомендации на каждом шаге.

Следующим этапом проектирования технологической операции является разработка рациональной структуры операции. На выбор структуры технологической операции в конкретных условиях производства влияет множество факторов: геометрическая конфигурация детали, требуемая точность обработки, качество получаемой поверхности, технологические возможности оборудования, приспособлений, режущего инструмента и т. д. Изменение структуры операции оказывает значительное влияние на станкоёмкость и трудоёмкость обработки. Следовательно, выбор рациональной структуры операции при планировании технологических процессов на уровне технологических операций является ключевым моментом для повышения показателя технико-экономической эффективности технологических процессов.

Задача проектирования структур технологических операций является комплексной, состоящей из нескольких этапов. Ключевым этапом является выбор рациональной последовательности технологических переходов для каждой операции, который начинается с этапа генерации возможных последовательностей обработки.

Исходными данными для генерации возможных последовательностей обработки в системе планирования многономенклатурных технологических процессов является множество кортежей технологических переходов $K=\{K_1, K_2, ..., K_n\}$, где n – количество кортежей. Каждый кортеж можно представить в виде неупорядоченного множества $K_i=\{K_{i1}, K_{i2}, ..., K_{im}\}$, где $i=1..n$, m – количество переходов в i-м кортеже. Каждый элемент множества K_i представляет собой множество характеристик отдельного перехода, одной из которых является код элементарной обрабатываемой поверхности. Для определения возможных последовательностей переходов внутри каждой отдельной операции необходимо в первую очередь упорядочить множества K_i.

Обозначим $S=\{S_1, S_2, \ldots, S_j, S_{j+1}, \ldots, S_{p-1}, S_p\}$ – множество различных элементарных поверхностей деталей, где $j=1..p$; p – количество элементарных поверхностей. Рассмотрим все возможные сочетания двух элементарных поверхностей без учёта порядка обработки: $S_1 – S_2$, …, $S_1 – S_j$, $S_1 – S_{j+1}$, …, $S_1 – S_{p-1}$, $S_1 – S_p$, …, $S_2 – S_j$, $S_2 – S_{j+1}$, …, $S_2 – S_{p-1}$, $S_2 – S_p$, …, $S_j – S_{j+1}$, …, $S_j – S_{p-1}$, S_j

– S_p, $S_{j+1} – S_{p-1}$, $S_{j+1} – S_p$, $S_{p-1} – S_p$. В связи с тем, что в одном кортеже может быть несколько элементарных поверхностей одного типа, имеют место и следующие пары: $S_1^1 – S_1^2$, $S_2^1 – S_2^2$, $S_j^1 – S_j^2$, $S_{j+1}^1 – S_{j+1}^2$, $S_{p-1}^1 – S_{p-1}^2$, $S_p^1 – S_p^2$. Далее необходимо установить возможные последовательности обработки рассматриваемых пар поверхностей в соответствии с накопленным технологическим опытом и рекомендациями к проектированию технологических операций.

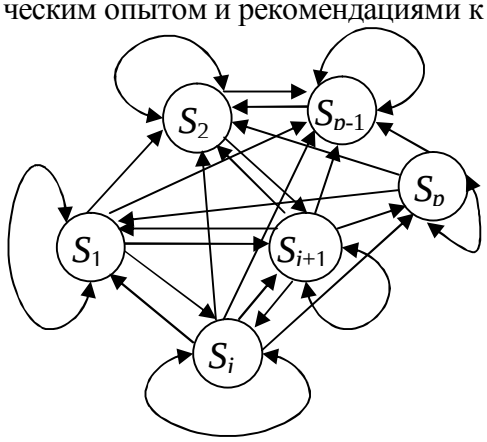


Рис. 2. Граф возможных последовательностей обработки элементарных поверхностей

Если в кортеже технологических переходов имеются три и более элементарных поверхностей, то необходимо составить множества возможных последовательностей обработки для трёх и более поверхностей. Число вариантов последовательностей стремительно возрастает с увеличением количества поверхностей в кортеже. В связи с этим для удобства представления и обработки информации воспользуемся математическим аппаратом теории графов. Каждой вершине графа (рис. 2) присваивается код элементарной поверхности. Каждая дуга между двумя вершинами выражает последовательность обработки, а именно: вершина с исходящей дугой определяет код поверхности, которая должна обрабатываться раньше по отношению к поверхности, указанной в вершине, на которую заходит дуга.

Если нет принципиальной разницы в последовательности обработки каких-либо двух поверхностей, то две вершины графа с данными поверхностями будут соединяться двумя противоположно направленными дугами. Последовательность обработки двух однотипных элементарных поверхностей обозначим в виде петли у соответствующей вершины графа.

После объединения данных пар вершин в граф $G=(V, E)$, где $V=\{S_1, S_2, \ldots, S_j, S_{j+1}, \ldots, S_{p-1}, S_p\}$ – множество вершин, эквивалентное множеству S; $E=\{(S_1, S_2), (S_1, S_j), (S_j, S_1), (S_1, S_{j+1}), (S_{j+1}, S_1), (S_1, S_{p-1}), (S_p, S_1), (S_j, S_2), (S_2, S_{j+1}), (S_{j+1}, S_2), (S_2, S_{p-1}), (S_{p-1}, S_2), (S_p, S_2), (S_j, S_{j+1}), (S_{j+1}, S_j), (S_j, S_{p-1}), (S_j, S_p), (S_{j+1}, S_{p-1}), (S_{j+1}, S_p), (S_p, S_{p-1}), (S_1^1, S_1^2), (S_2^1, S_2^2), (S_j^1, S_j^2), (S_{j+1}^1, S_{j+1}^2), (S_{p-1}^1, S_{p-1}^2), (S_p^1, S_p^2)\}$ – множество ориентированных рёбер, получаем модель, отражающую последовательности обработки элементарных поверхностей.

Для определения возможной последовательности обработки i-го кортежа, состоящего из m переходов, из графа G выбирается подграф, вершины которого соответствуют обрабатываемым поверхностям в кортеже. Затем непосредственно определяется последовательность обработки путём обхода вершин по стрелке с соблюдением следующих условий:

1) каждая вершина должна включаться в маршрут столько раз, сколько раз встречается в кортеже технологических переходов элементарная поверхность, соответствующая данной вершине;

2) для каждой вершины S_j, где $j=2..m$, не должно быть исходящей дуги в направлении каждой из предыдущих вершин S_k, где $k=1..(j-1)$, либо между этими вершинами должны быть противоположно ориентированные дуги.

После выбора возможных вариантов последовательностей переходов для каждого кортежа технологических переходов имеем семейство упорядоченных множеств K'. Каждое множество в семействе K' представляет собой возможный вариант структуры технологической операции. Если существует несколько возможных последовательностей обработки для одного и того же кортежа переходов, то на следующих этапах проектирования структур технологических операций необходимо произвести отсев нерациональных и выбор наиболее эффективных вариантов последовательностей обработки [5].

Отсев нерациональных вариантов последовательностей переходов в первую очередь производится по степени точности обработки, а затем по относительному расположению обрабатываемых поверхностей. Выбор рациональных вариантов последовательностей переходов осуществляется по критерию минимизации штучно-калькуляционного времени операции.

Расчёт режимов резания и нормирование технологических операций производятся по известной методике для каждого варианта технологической операции. В результате из всех вариантов операций выбирается операция с минимальным штучно-калькуляционным временем, для которой генерируется технологическая документация.

Таким образом, разработанные методики позволяют формализовать наиболее трудоёмкие этапы проектирования технологических операций фрезерной обработки и на их основе создать алгоритмы и программные процедуры, полностью автоматизирующие процесс проектирования, что существенно сократит время проектирования технологических операций и повысит качество проектных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочкарёв П.Ю. Основные принципы разработки операций в системе планирования технологических процессов механообработки / П.Ю. Бочкарёв, В.А. Назарьева // СТИН. 2006. № 10. С. 2-6.

2. Бочкарёв П.Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки / П.Ю. Бочкарёв // Технология машиностроения. 2002. № 1. С. 10-14.

3. Бочкарёв П.Ю. Планирование технологических процессов в условиях многономенклатурных механообрабатывающих систем. Теоретические основы разработки подсистем планирования маршрутов технологических операций: учеб. пособие / П.Ю. Бочкарёв, А.Н. Васин. Саратов: СГТУ, 2004. 136 с.

4. Митин С.Г. Генерация и отсев вариантов технологической оснастки при автоматизированном проектировании операций для оборудования фрезерной группы / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарёв // Вестник СГТУ. 2009. №2 (39). С. 25-31.

5. Митин С.Г. Подсистема проектирования рациональной структуры технологических операций для оборудования фрезерной группы / С.Г. Митин // Вестник СГТУ. 2009. №3 (41). С. 141-144.

Митин Сергей Геннадьевич –
кандидат технических наук, ассистент кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета

Mitin Sergey Gennadyevich –
Candidate of Technical Sciences of the Department of «Technical and Technological systems Design» of Saratov State Technical University

Бочкарёв Пётр Юрьевич –
доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета

Bochkarev Pyotr Yuryevich –
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Technical and Technological systems Design» of Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 20.05.2011, принята к опубликованию 24.06.2011