

### Аннотация

Статья посвящена проблеме обеспечения комплексного ресурсосбережения на машиностроительном предприятии технологическими методами. Авторами предложен подход к ее решению, основанный на компактной реструктуризации производства непрофильной продукции с выделением организационно и технологически обособленного участка, включающего минимально необходимый набор станочного оборудования. Обсуждаются пути реализации и эффективность соответствующих технологических мероприятий. Показана возможность автоматизации технологической подготовки ресурсосберегающего производства на основе стандартных программных средств.

### Summary

The problem of all-up resources saving at the machine-building plant is considered. The proposed approach to its solution grounded on a compact re-structuring of not profile commodity production on the localized bay, which includes a minimally indispensable set of the machinery equipment. The ways of realization and efficiency of the applicable technological measures are discussed. The possibility of an automation of the technological preparing of the resources saving production on the basis of standard software is shown.

УДК 658.26.004

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСАМИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Д.Н. Свирский*  
УО «Витебский государственный  
технологический университет»

Ресурсосбережение является одним из существенных факторов повышения конкурентоспособности машиностроительного производства и его продукции. Работа по ресурсосбережению проводится на всех этапах жизненного цикла изделия [1], но наибольший эффект от нее получается при принятии грамотных технико-экономических решений на этапе технической подготовки производства. На стадии разработки продукции основное внимание в области ресурсосбережения уделяется отработке изделий на технологичность. С этой целью рекомендуется использовать хорошо зарекомендовавшие себя в отечественной и зарубежной практике методы квалиметрического и функционально-стоимостного (АВС) анализа. Задача синтеза оптимального управления производственными ресурсами в соответствии с «гипотезой делимости» Н.Н.Моисеева решается в два этапа: 1) планирования – строится программная (плановая) траектория; 2) регулирования – определяется управляющее воздействие, реализующее программу [2]. Поэтому для ресурсосбережения на этапе производства продукции необходимо выработать соответствующие инженерные решения на предшествующей стадии его технологической подготовки. В этих условиях представляется целесообразным при проектировании технологических процессов использовать методы исследования операций, в частности, оптимального многошагового управления дискретными процессами в форме динамического программирования.

Известно, что в основе динамического программирования лежит принцип оптимальности Беллмана: оптимальное поведение обладает тем свойством, что, каково бы ни было первоначальное состояние и решение в начальный момент, последующие решения должны составлять оптимальное поведение относительно состояния, полученного в результате первого решения [3]; или в другой формулировке: каково бы ни было состояние управляемой системы перед очередным шагом, надо выбирать управление на этом шаге так, чтобы выигрыш на данном шаге вместе с оптимальным выиг-

рышем на всех последующих шагах был максимальным [4]. При оптимизации управления методом динамического программирования весь многошаговый процесс «проходится» дважды: от конца к началу и обратно. Процесс динамического программирования разворачивается от конечного (целевого) состояния управляемого объекта к начальному его состоянию. Планируя последний шаг необходимо сделать разные предположения о состоянии объекта на предпоследнем шаге и найти условное оптимальное управление, переводящее систему из каждого из возможных исходов предпоследнего шага в целевое состояние. Далее, «потясь назад», находятся условные оптимальные управления на всех предыдущих шагах вплоть до самого первого. Затем, зная все пошаговые условные оптимальные управления можно построить оптимальное управление и определить оптимальный (максимальный) выигрыш при будущей реализации всего планируемого процесса. Необходимо отметить, что первый этап – условной оптимизации – несравненно сложнее и длительнее второго – «безусловной» оптимизации.

Возможность и эффективность применения метода динамического программирования предопределена использованием функционального подхода В.Д.Цветкова к представлению компонента технологического процесса любого уровня декомпозиции: этапа, операции, перехода и т.д. [5] в качестве оператора «трансформации и сохранения качества» объекта производства в пространстве фазовых координат технологических сред [6]. Действительно, функция компонента технологического процесса  $\Phi_{\text{ТП}}$  заключается в преобразовании заготовки из исходного качественного состояния  $E_0$ , полученного в ходе реализации предыдущего компонента, в конечное (промежуточное) состояние  $E_k$ :

$$\Phi_{\text{ТП}} : E_0 \rightarrow E_k.$$

Состояния заготовки на входе и выходе каждого процессуального компонента определяются значениями параметров качества – набора фазовых координат. Таким образом, задача технологического проектирования как задача оптимального управления состоит в определении характеристик компонентов технологического процесса (технологических сред) при известных значениях комплекса показателей качества изделия, задаваемых чертежом. В качестве интегрированного критерия оптимального использования ресурсов при этом принимается минимальная технологическая себестоимость изготовления изделия.

Примеры использования элементов динамического программирования при оптимизации плана механической обработки поверхности заготовки приводят Н.М.Капустин и А.М.Дальский с сотрудниками [7, 8]. При выборе плана многопереходной обработки преследуется цель достичь заданного состояния формы детали, удаляя припуск за наименьшее число переходов, т.е. с наименьшими затратами.

Варианты многопереходной обработки рассматриваются как наборы переходов с различными характеристиками, выполняемые в определенной последовательности и с конкретными затратами. При представлении маршрута многопереходной обработки графом, вершины последнего соответствуют значениям точностных показателей обработки поверхности (например, допуску на размер  $T$ ), а ребра – параметрам перехода. Каждому ребру произвольной цепи, построенному для конкретного значения глубины резания  $t_i$ , подачи  $s_i$  и скорости резания  $v_i$  (частоты вращения  $n_i$ ) будет соответствовать определенная технологическая себестоимость  $C_{\text{неп}i}$  реализации перехода  $i$ . Тогда задача структурной оптимизации плана  $p$ -переходной обработки поверхности заготовки формально может быть поставлена следующим образом: нужно отыскать цепь, дающую минимальное значение целевой функции

$$C_p = \sum_{i=1}^p C_{пер i} \rightarrow \min$$

при ограничениях по мощности резания, допустимому усилию на механизме подачи станка и режущем инструменте, принятой стойкости режущего инструмента, применяемым значениям подачи, частоты вращения и диапазону скоростей резания, шероховатости, обеспечиваемой конечным переходом, технологическим допускам на промежуточных и конечном переходах.

При поиске оптимального варианта маршрута обработки поверхности динамическим программированием общий припуск на поверхности разделяется на  $N$  уровней (рис. 1).

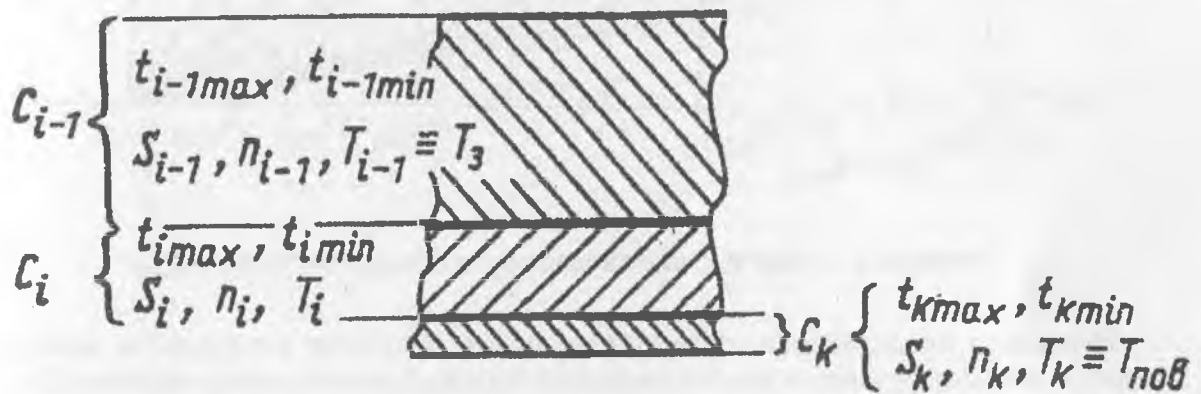


Рисунок 1 - Параметры многопереходной обработки поверхности

Первый уровень соответствует заключительному переходу обработки поверхности. При назначении условий обработки на этом уровне необходимо знать точность выполнения предыдущего перехода, выбираемую из ряда  $T_{заг}, \dots, T_i, T_{i-1}, \dots, T_1 = T_{пов}$ . Припуск на первом уровне равен наименьшей глубине резания  $t_{min}$ , исходя из требуемого значения шероховатости поверхности; на втором уровне  $t_{min} + \gamma$ ; на третьем –  $t_{min} + 2\gamma$ . На любом уровне с номером  $m$  слой снимаемого материала определится значением  $t_{min} + (m - 1)\gamma$ . Шаг  $\gamma$  зависит от кинематики станка и равен минимально возможному задаваемому перемещению (обычно принимается  $\gamma = t_{min}$ ).

В соответствии с принципом оптимальности при проектировании любого  $i$ -го перехода делается предположение о точности предыдущего перехода. Выбрав  $T_{i-1}$  и зная допуск  $T_i$ , рассчитывается  $t_i = t_{min} + (m - 1)\gamma + T_{i-1} - T_i$  и определяются возможные сочетания подачи и скорости резания, удовлетворяющие ограничениям математической модели. Для каждого фиксированного  $T_{i-1}$  глубина резания изменяется с увеличением  $m$  от 1 до максимального значения  $N$ . По каждому варианту для  $T_{i-1}, T_i, t_i, s_i, v_i$  рассчитывается  $C_{пер i}$ . После завершения варьирования  $T_{i-1}$  от  $T_{заг}$  до  $T_{пов}$  (всего  $L$  вариантов) из всех возможных вариантов выбирают тот вариант, который имеет минимальное значение технологической себестоимости перехода  $C_{пер i} = \min$  (рис. 2). После выбора условий обработки  $i$ -го перехода рассматривается предыдущий  $(i - 1)$  переход, для которого найденный допуск будет конечным, а начальный допуск  $T_{i-2}$  необходимо выбрать. Так же определяется оптимальный вариант с  $C_{пер i-1} = \min$ .

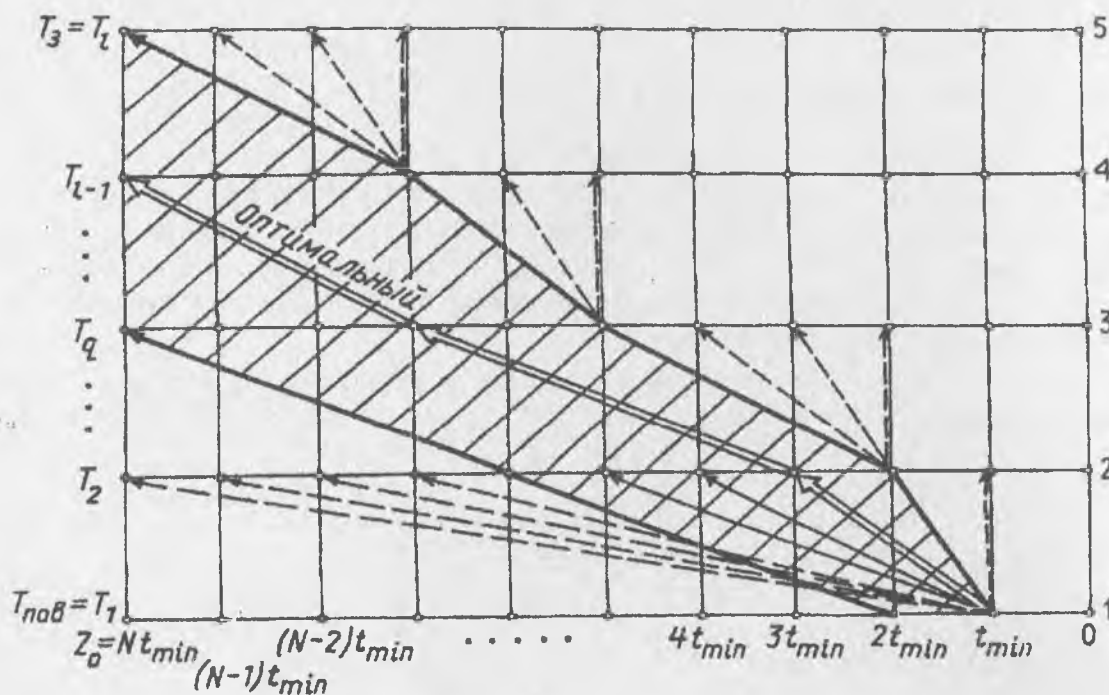


Рисунок 2 - Граф вариантов маршрута обработки поверхности

Логическим продолжением оптимизации плана обработки поверхности заготовки является оптимизация всего технологического процесса изготовления изделия. Как и в предыдущем случае применяется стоимостной критерий оптимизации. Некий технологический процесс осуществляется в  $N$  этапов дискретных этапов, каждый этап  $i$  реализует один из возможных вариантов, причем каждый вариант характеризуется своей стоимостью  $C_{i, j}$  [9]. Если на  $i$ -ой ступени выбран  $j$ -тый вариант, то процесс как объект оптимального управления находится в состоянии  $E_{i, j}$ . Допустимыми вариантами маршрутов является  $N$  комплектов положительных целых чисел  $j_1, \dots, j_N$  при  $1 \leq j_i \leq M_i$  и  $1 \leq i \leq N$ , что говорит о том, что процесс проходит состояния  $E_{1, j_1}, \dots, E_{N, j_N}$ . При этом не исключаются запрещенные переходы между соседними состояниями. Находится разрешенный путь (технологический маршрут), в котором достигается минимум целевой дискретной функции по уравнению:

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N C_{i, j_i}$$

Определение числа допустимых путей  $Z_k$ , т.е. возможных сочетаний операций процесса, осуществляется с помощью матрицы перехода  $Z^{(i)}$  между двумя соседними ступенями  $i$  и  $i + 1$ . Для модели процесса, изображенной на рис. 3 число возможных технологических маршрутов:

$$Z_k = Z^{(1)} Z^{(2)} Z^{(3)} = 138,$$

где  $Z^{(1)} = \begin{pmatrix} 111 \\ 000 \\ 000 \\ 000 \\ 000 \\ 111 \end{pmatrix}$ ;  $Z^{(2)} = \begin{pmatrix} 101111 \\ 101111 \\ 101111 \end{pmatrix}$ ;  $Z^{(3)} = \begin{pmatrix} 01011 \\ 10101 \\ 11111 \\ 11111 \\ 11111 \\ 11111 \end{pmatrix}$ ,

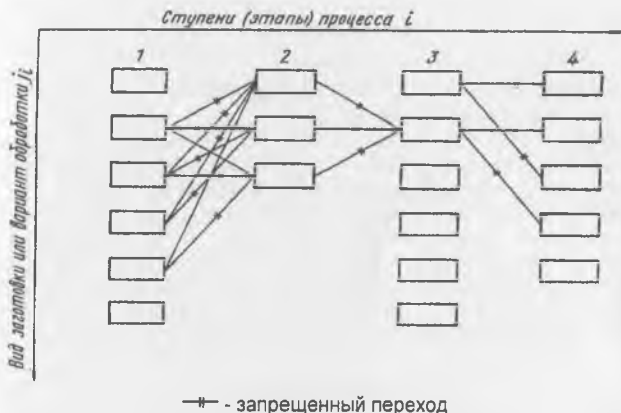


Рисунок 3 - Граф вариантов маршрута [9]

Если для технологического процесса стоимость изготовления по варианту  $j$  в операции  $i$  зависит только от этого варианта и от вариантов предыдущих операций

$$C_{i,j} = f(E_{i,j}, E_{i-1,j-1}),$$

то каждому переходу

$$E_{i-1,j-1} \rightarrow E_{i,j}$$

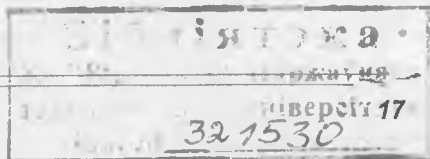
будет соответствовать однозначное приращение стоимости  $C_{i-1,j-1}^{(0)}$ .

Переход от операции  $i-1$  к операции  $i$  задается матрицей стоимости  $[C_{i-1,j-1}^{(0)}]$ .

Для состояния  $C_{i,j}$  действительны минимальные стоимости

$$C_{i,j \min} = \text{Min} (C_{i-1,j-1}^{(0)} + C_{i-1,j}^{(0)}), \text{ при } 1 \leq j-1 \leq M_{i-1}, 1 \leq j \leq M_i \text{ и } 2 \leq i \leq N. \quad (*)$$

Они получаются минимальными по отношению ко всем  $M_{i-1}$  вариантам в  $(i-1)$ -й операции и ко всем возможным стоимостям, которые возникают на  $i$ -й операции при переходе  $E_{i-1,j-1} \rightarrow E_{i,j}$ . Тогда целевая функция по уравнению (\*) для динамической оптимизации



$$c = \sum_{i=1}^N C_{j_{i-1}, j_i}, \text{ при } j_i = 1.$$

В результате рекуррентного применения уравнения (\*), вплоть до расчета  $C_{N, j_N}$  при  $1 \leq j_N \leq M$ , получаем при

$$\text{Min} \left\{ \sum_{i=1}^N C_{j_{i-1}, j_i} \right\} = \text{Min} (C_{N, j_N})$$

минимальное значение целевой функции  $c$ .

Фиксированием значения  $j_{i-1}$ , соответствующего минимуму по уравнению (\*), также получается соответствующий оптимальный путь.

Таким образом решается задача оптимального управления ресурсами методом динамического программирования на этапах планирования обработки поверхности заготовки и синтеза принципиальной схемы технологического процесса. К сожалению, метод динамического программирования не применим для решения такой важной задачи технологического проектирования как синтез структуры операции. Оптимальное управление структурой операции представляет собой задачу комбинаторной оптимизации, наиболее эффективными методами решения которой в настоящее время являются технологии компьютерного эволюционного моделирования на основе применения искусственных нейронных сетей, генетических алгоритмов и их комбинаций [10].

#### Список использованных источников

1. Волков Б.Н., Яновский Г.А. Основы ресурсосбережения в машиностроении. Л.: Политехника. 1991. С. 42-73.
2. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. М.: Наука. 1975. 528 с.
3. Основы теории оптимального управления. Под ред. В.Ф.Кротова. М.: Высш. шк. 1990. С. 338.
4. Венцель Е.С. Исследование операций. М.: Наука. 1988. 208 с.
5. Цветков В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов. Мн.: Наука и техника. 1979. 264 с.
6. Васильев А.С. Определение количественных характеристик оперативной трансформации свойств изделий в технологических средах // Изв. ВУЗов. Машиностроение. 1999. №4. С. 42-47.
7. Капустин Н.М., Васильев Г.Н. Автоматизация конструкторского и технологического проектирования. М.: Высш. шк. 1990. С. 111-117.
8. Технология машиностроения. Под ред. А.М.Дальского. М.: Изд. МГТУ. 1997. Т. 1. С. 454-458.
9. Якобс Г.Ю. и др. Оптимизация резания. М.: Машиностроение. 1981. С. 192-198.
10. Свицкий Д.Н. Применение методов генетического программирования для выбора композиционного материала послойной листоштамповочной оснастки // Материалы XIII Петербургских чтений по проблемам прочности. С.-Пб.: ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН. 2002. С. 58.

#### Аннотация

Проблема комплексного ресурсосбережения при осуществлении технологических процессов машиностроительного производства интерпретируется как задача оптимального управления. В качестве интегрального критерия ресурсосбережения принята



технологическая себестоимость изготовления изделия. Для решения задачи оптимального управления в виде дискретной оптимизации применяется динамическое программирование. Предлагаемый подход иллюстрируется примерами решения задач планирования обработки поверхности заготовки и синтеза принципиальной схемы технологического процесса.

#### Summary

The problem all-up resources saving during the machine-building production manufacturing processes realization is interpreted as a problem of optimal control. The technological cost price of article fabrication is accepted as integrated criterion of the resources saving. The dynamic programming is applied for solution of a task of optimal control in a discrete optimization form. The proposed approach is illustrated by the examples of solving of the tasks of planning of blank surface machining and manufacturing process principal scheme synthesizing.

УДК 621.762

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ В ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПРЕССОВКАХ, ПОЛУЧЕННЫХ КВАЗИИЗОСТАТИЧЕСКИМ ПРЕССОВАНИЕМ

**С.С. Клименков, А.Н. Голубев, П.В. Станкевич**  
*УО «Витебский государственный  
технологический университет»*

Твердосплавный режущий и формообразующий инструмент находит широкое применение благодаря высоким эксплуатационным свойствам. Заготовки для изготовления такого инструмента возможно получать только по технологии порошковой металлургии.

Эксплуатационные свойства инструмента во многом определяются физико-механическими свойствами порошковой прессовки, которая в дальнейшем подвергается спеканию и механической обработке. При изготовлении прессовки традиционным является выбор из двух наиболее распространенных способов прессования: с одной стороны, прессование в жестких пресс-формах [1] (способ дает высокую точность, качество поверхности, производительность, но неравномерную плотность прессовки по объему), с другой стороны – изостатическое прессование [2] (прессовка получается равноплотной, есть возможность прессовать крупногабаритные изделия). Более распространено применение первого способа, поскольку для изостатического прессования требуется более сложное оборудование, усложняющее и удорожающее процесс. Способы прессования эластичным инструментом [3] также малоприменимы в силу определенной сложности расчета размеров и изготовления такого инструмента.

Сотрудниками УО «ВГТУ» разработан способ квазиизостатического прессования [4], совмещающий достоинства описанных выше способов, применение которого оправдано при изготовлении изделий сложной формы в условиях единичного и мелкосерийного производства. Принципиальная схема способа приведена на рис. 1, где 1 – верхний (подвижный) пуансон; 2 – матрица; 3 – уплотнительная прокладка; 4 – прессовка; 5 – среда, передающая давление; 6 – нижний (неподвижный) пуансон.

Ранее [5] был проведен ряд экспериментов по определению степени равноплотности прессовок, полученных данным способом прессования. Результаты, полученные на прессовках из железного порошка, свидетельствуют о существенном повышении равноплотности прессовок по сравнению с изделиями, получаемыми в жестких пресс-формах, и приближению показателя равноплотности к результатам, характерным для изостатического прессования. Однако, эти результаты не позволяют судить о возмож-