

УДК 62 1.9.06-52

Разработка математической модели оптимальной последовательности обработки плоскостей и других взаимосвязанных поверхностей сложных корпусных деталей

Кравченко И. И.^{1,*}, Киселев В. Л.¹

knig@yandex.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Станки с ЧПУ, особенно пятикоординатные многооперационные станки – дорогостоящее оборудование, позволяющее за один установ заготовки обработать в корпусной детали со всех сторон группу плоскостей и расположенных в них отверстий. Обработка на них выполняется последовательно одним инструментом, поэтому на очередность выполнения переходов влияет требующаяся производительность при обеспечении качества и точности обрабатываемых поверхностей. Задачей данной работы является минимизация вспомогательного времени на основе разработки математической модели оптимизации последовательности механической обработки поверхностей сложных корпусных деталей с учетом технологических правил построения операций. В основу модели положен принцип Беллмана (задача о коммивояжере), позволяющий реализовать в математической модели технологические закономерности проектирования операций. Разработанная математическая модель, алгоритм и программа могут быть использованы в качестве модулей в автоматизированных системах проектирования технологических процессов. Это позволяет сократить штучное время обработки заготовок, способствует повышению производительности обработки и уменьшению затрат времени на холостые взаимные перемещения рабочих органов станка.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства, корпусная деталь, многоцелевой станок, алгоритм, математическая модель, группа плоскостей и отверстий, система координат, целевая функция, производительность, себестоимость

При обработке деталей на многооперационных станках важно знать факторы и их влияние обеспечивающие максимальную производительность. В работах [1,2] приведен подробный анализ, показывающий влияние основных факторов характеризующих обработку на этих станках.

Аналитическая зависимость производительности от интенсификации режимов обработки, от количества смен инструментов, от времени смены инструмента и от потерь холостых ходов [2]:

$$Q = \frac{K_0 X}{1 + K_0 X t_x + K_0 X \sum_{i=1}^N A_i (t'_{cm} + t'_k) + K_0 X \sum_{i=1}^N C_i}, \quad (1)$$

где X – коэффициент интенсификации режимов обработки; K_0 – технологическая производительность базового варианта, $K = \frac{1}{t_p}$, t_p – время на осуществление рабочих ходов; t_x – время затрачиваемое на вспомогательные переходы (установка и сьем детали, холостые перемещения детали и инструмента и т.д.); A_i – повторяемость использования i -го инструмента при обработке заготовки, ($A = 1, 2, 3, \dots, N$); $t_{см} + t'_к$ – время смены и координации одного режущего инструмента; $\sum_{i=1}^N C$ – сумма потерь времени, связанного с эксплуатацией инструмента.

При определении оптимального плана обработки поверхностей корпусной детали, используя критерий минимальной себестоимости, математическая модель интенсифицирует режимы обработки, обеспечивая при этом требуемые параметры качества детали. Необходимо знать соответствуют ли эти условия максимальной производительности?

Исследования формулы (1) показывают, что при данных условиях обработки детали имеется такое значение X , которое обеспечивает максимальную производительность. Однако, кривые (рис.1) полученные по формуле (1), путем изменения X и t_x , при постоянных остальных членах, показывает, что с увеличением потерь t_x , характер кривых производительности меняется, они становятся более пологими. Для одного и того же значения аргумента X_{max} , кривые характеризуются различными значениями максимальной производительности, уровень которой определяется величиной t_x . Это обстоятельство означает, что при обработке деталей на многооперационных станках только при соответствующем уменьшении t_x (в дальнейшем под t_x , будем понимать вспомогательное время) можно обеспечить максимальную производительность. Если время, входящее в состав t_x , затрачиваемое на установку и сьем детали, включения и выключения отдельных механизмов и т.д. многооперационного станка сведено к минимуму, то время, затрачиваемое на взаимные холостые перемещения детали и инструментов, необходимо уменьшать за счет оптимальной последовательности обработки поверхностей детали, последовательности смены инструмента, перемещений и поворотов стола.

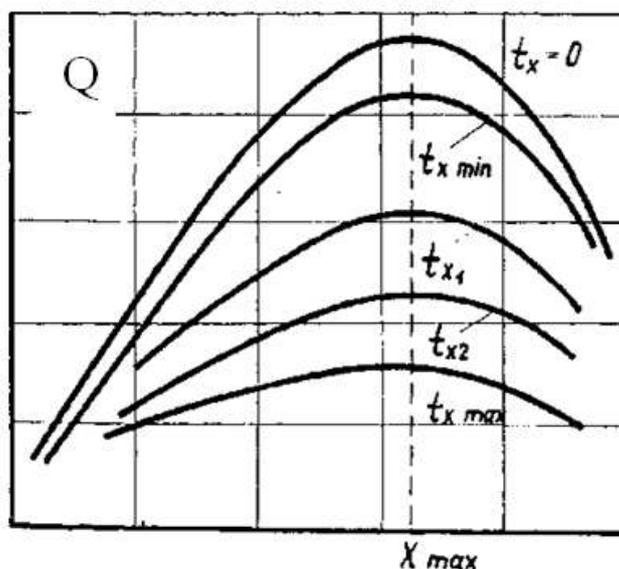


Рис.1. Зависимость производительности от изменения скорости резания и времени холостых ходов

В общем цикле обработки корпусной детали вспомогательное время составляет до 35% [4]. Уменьшить вспомогательное время можно за счет оптимизации последовательности обработки отверстий, плоскостей, а также последовательности смены инструмента, позиционирования и поворотов стола. Эта задача является многовариантной, трудоемкой и обеспечить её решение возможно только с применением ЭВМ при наличии определенных алгоритмов, отражающие конкретные условия обработки детали.

Многооперационные станки, особенно горизонтальной компоновки, позволяют достичь максимальную концентрацию переходов за один установ детали [3]. При этом возникает задача такой последовательности переходов обработки поверхностей при известных технологических параметрах, чтобы время взаимных холостых перемещений заготовки и инструментов было минимальным. Это обстоятельство означает, что при обработке деталей на многооперационных станках только при соответствующем уменьшении t_x можно обеспечить максимальную производительность. Задачу по нахождению оптимальной последовательности обработки поверхностей детали относят к задаче коммивояжера.

В работах [4,5] решена методом Литтла частная задача определения оптимальной последовательности обработки только отверстий корпусных деталей на многооперационных станках в несколько переходов различными инструментами. Итеративный метод решения классической задачи коммивояжера, предложенный Литтлом, считается в общем случае наиболее эффективным, но применимость этого метода к нашей задаче ограничена в силу невозможности метода формировать технологические ограничения технологическим задачам ограничена.

В постановке данной задачи корпусную деталь (рис.2) можно представить как совокупность различных по точности и шероховатости плоскостей I, II, III, IV, ..., расположенных в них отверстий 1,2,3, ..., пазов, карманов, окон и т. п. (рис. 2, 3).

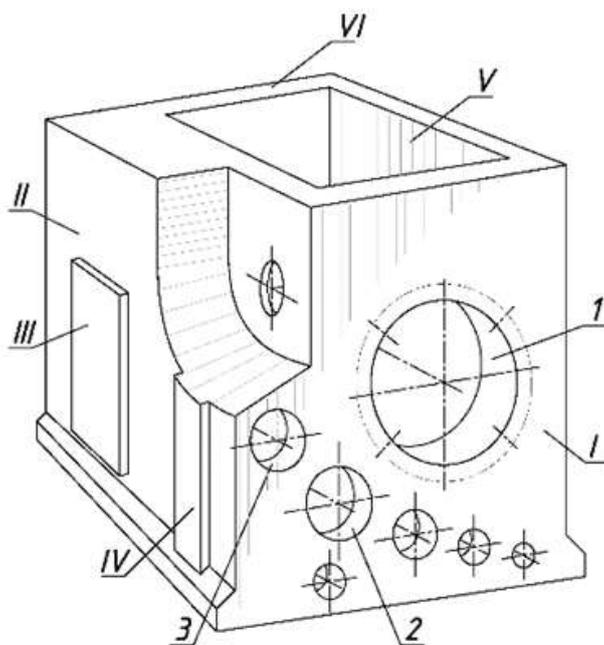


Рис. 2. Корпусная деталь, обрабатываемая на многооперационном станке



Рис. 3. Схема нумерации переходов

Наибольший процент механической обработки корпусной детали составляет обработка плоскостей и отверстий. Причем, расположение точных плоскостей и отверстий регламентировано требованиями чертежа, которые накладывают ограничения при назначении последовательности обработки поверхностей корпусной детали. И так, требуется найти оптимальную, с точки зрения временных затрат, последовательность выполнения переходов при обработке плоскостей и точных отверстий корпусной детали. в пределах черновой обработки одной плоскости может осуществляться обработка пазов, карманов, окон. Число плоскостей и отверстий требующих обработки - N . На i -той поверхности $0 \leq i \leq N$ необходимо выполнить K_i переходов, из которых последний может быть чистовым и выполняется чистовым инструментом. Остальные выполняются одним и тем же черновым инструментом.

Задачу нахождения маршрута можно разделить на две части: а) построение симметрической матрицы временных затрат (рис. 3); б) преобразование матрицы и поиск оптимального решения. Для построения матрицы временных затрат, кроме геометрических планов обработки, необходимо знать структуру элементов вспомогательного времени.

На станках с программным управлением вспомогательное время t_B является функцией количества выполняемых переходов K , габаритов детали, технических характеристик станка: скорости позиционирования $V_{\text{поз}}$ » времени поворота стола $t_{\text{пс}}$ и смены спутника $t_{\text{ссп}}$, времени смены инструмента $t_{\text{си}}$ расположения детали относительно рабочих органов станка.

По окончании обработки плоскости стол и шпиндель выходят в зону позиционирования длина которой зависит от места положения детали на столе, её габаритов, а также вылета инструмента. Длина зоны позиционирования $L_{\text{поз}}$ рассчитывается в каждом конкретном случае на основании разработанной наладки. При смене инструмента шпиндель перемещается в зону смены инструмента проходя расстояние $l_{\text{си}}$. При повороте стола без смены инструмента последний должен быть перемещен на расстояние $l_{\text{си}}$, обеспечивающее беспрепятственный поворот стола.

Структура элементов вспомогательного времени может быть представлена как

$$t_B = \sum_1^m [t_{\text{си}} + t_p + \sum_1^{n-1} t_{\text{поз } i} + \omega t_{\text{пс}} + t_{\text{бозси}} + (2n-1)t_{\text{бозп}}] - \sum t_{\text{совмещ}} + 2t_{\text{ссп}}, \quad (2)$$

где m - число смен инструмента; $t_{\text{си}}$ – время смены инструмента t_p - время, затрачиваемое на изменение режимов резания; n – количество переходов; ω – число поворотов стола при обработке одним инструментом; $t_{\text{совмещ}}$ - сумма совмещенных элементов вспомогательного времени; $t_{\text{пс}}$ - время поворота стола; $t_{\text{бозси}}$ - время быстрого отвода шпинделя в зону смены инструмента; $t_{\text{бозп}}$ - время быстрого отвода шпинделя в зону позиционирования; $t_{\text{ссп}}$ - время смены спутника; $t_{\text{совмещ}}$ - сумма совмещенных элементов вспомогательного времени.

Величина элементов в формуле (2) носит переменный характер в зависимости от вида оборудования, детали, инструмента и расчет их может осуществляться с учетом рекомендаций приведенных в работах [1].

Принимаем матрицу затрат вспомогательного времени связанного с переходом от i - той поверхности к j -той известной и равной $\{t_{i,j}\}$. При этом выполняется неравенство треугольника $t_{ij} \leq t_{ik} + t_{kj}$. Если переход от обработки i -той поверхности к j -той сопровождается сменой инструмента, то соответствующее время вычисляется по формуле $d_{ij} = \max\{t_{ij}, \dots, t_{\text{си}}\}$, где $t_{\text{си}}$ время смены инструмента.

В отличие от классической постановки наша задача включает некоторые ограничения: 1) если i -й и j -й переходы соответствуют черновой и чистовой обработке, то i -й должен предшествовать j -му; 2) если l и k соответствуют чистовым переходам на плоскостях и отверстиях, взаимное расположение которых оговорено требованиями чертежа то, для уменьшения отклонения их расположения, осуществляется один из двух вариантов их выполнения - l следует за k или k следует за l ; 3) в частном случае, технологу, для удобства программирования угловых координат, необходимо задать начальную поверхность обработки.

Наличие дополнительных, по сравнению с классической постановкой задачи коммивояжера, ограничений 1,2 и 3 не позволяют применить к нашей задаче общепринятые алгоритмы, в частности алгоритмы Литтла.

Нами был применен метод динамического программирования, впервые использованный для решения задачи коммивояжера Р.Беллманом [6,7]. Принцип Беллмана утверждает, что если некоторая функция качества имеет вид аддитивного функционала (сумма простых сумм), то конечный отрезок оптимальной траектории - оптимален.

Работа алгоритма может быть представлена следующим образом. На первом этапе составляется таблица $t_{\text{в}}\{t_{ij}\}$ совпадающая с матрицей затрат. Последняя заполняется программистом по данным карт наладки, составленных для конкретной детали, следующим образом. Пусть необходимо найти оптимальную последовательность обработки поверхностей детали (см. рис.2, 3), имеющей N плоскостей и точных отверстий. При этом необходимо выполнить n переходов. Переходы, соответствующие поверхностям, нумеруются в произвольном порядке. Так, переходы 2, 4, 8...(рис. 3) соответствуют чистовой, а 1, 3, 7, ... - черновой обработке плоскостей I, II, III,...Переходы 6, 10 соответствуют чис-

товой, а 5, 9 – черновой обработке отверстий. Переходы 2 и 8 взаимосвязаны по расположению требованиями чертежа.

Фрагмент матрицы $\{t_{vij}\}$ имеет вид показанный на рис. 4. Матрица симметрическая главная диагональ отмечена знаком ∞ . Заполнение матрицы производится с конца в последовательности: 1) взаимосвязанные переходы; 2) чистовые не взаимосвязанные; 3) чистовые взаимосвязанные; 4) оставшиеся черновые (в любом порядке). Если отсутствуют взаимосвязанные переходы, то последовательность будет: 1) чистовые переходы; 2) соответствующие им черновые. Элементы матрицы – время, затраченное на переход от обработки поверхности i к j . Знак ∞ обозначает запрет на переход i к j . Преимуществом данного подхода к решению поставленной задачи является то, что в матрице временных затрат имеется возможность запретить исходя из технологических закономерностей рассчитывать заранее не реальные варианты обработки, например: невозможно выполнить обработку отверстия в сплошном материале зенкерованием не выполнив предварительно его сверлением, этот запрет отражается в матрице знаком ∞ . По математической модели были разработаны алгоритм и программа на языке Turbo Pascal.

		Черновые переходы				Чистовые		Взаимосвязанные переходы					
$i \backslash j$		3	n-1	5	1	7	4	n	...	2	6	2	8
3		∞	t_{3n-1}	t_{35}	t_{31}	t_{37}	t_{34}	∞		t_{32}	t_{36}	t_{32}	t_{38}
n-1		t_{n-13}	∞	t_{n-15}	t_{n-11}	t_{n-17}	t_{n-14}	t_{n-1n}		t_{n-12}	t_{n-16}	t_{n-12}	t_{n-18}
5		t_{53}	t_{5n-1}	∞	t_{51}	t_{57}	t_{54}	t_{5n}		t_{52}	t_{56}	t_{52}	t_{58}
1		t_{13}	t_{1n-1}	t_{15}	∞	t_{17}	t_{14}	t_{1n}		t_{12}	t_{16}	t_{12}	t_{18}
7		t_{73}	t_{7n-1}	t_{75}	t_{71}	∞	t_{74}	t_{7n}		t_{72}	t_{76}	t_{72}	t_{78}
			t_{45}	t_{41}	t_{47}	∞	t_{4n}			t_{42}	t_{46}	t_{42}	t_{48}
						t_{n4}	∞			t_{n2}	t_{n6}	t_{n2}	t_{n8}
.....													
										t_{26}	∞	t_{25}	
													∞

Рис. 4. Фрагмент матрицы вспомогательных времен

Преобразование матрицы (рис. 4) происходит в модуле (рис.5), в котором указывается размерность матрицы, (здесь размерность 36x36 переходов), по картам наладки в ячейках матрицы расставляются возможные начала и окончания обработки, времена на выполняемые (ячейка 1-3 «время 14,7») и на запрещенные (ячейка 12-2 «время 000.0»)

технологические переходы. По программе расчета модуля данных (рис.5) вычисляется оптимальная последовательность выполнения технологических переходов модуля (рис.6).

Нач	Кон		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
нач		1	000,0	11,3	14,7	16,3	17,4	22,6	23,2	20,8	16,1	5,5	50,0	61,3	6
нач		2	11,3	000,0	4,5	11,5	14,8	24,6	26,6	25,7	21,9	15,7	61,3	50,0	5
нач		3	14,7	4,5	000,0	7,0	11,5	21,6	24,8	25,2	22,7	17,6	64,7	54,5	5
нач		4	16,3	11,5	7,0	000,0	6,2	12,8	20,6	22,4	21,3	13,9	66,3	61,5	5
нач		5	17,4	14,8	11,5	6,2	000,0	6,7	14,6	17,4	18,0	16,1	67,4	64,8	6
нач		6	22,6	24,6	21,6	17,8	6,7	000,0	10,4	18,3	20,6	22,4	72,6	74,6	7
нач		7	23,2	26,6	24,8	20,6	14,6	10,4	000,0	10,5	18,2	19,7	73,2	76,6	7
нач		8	20,8	25,7	25,7	22,4	17,4	18,3	10,4	000,0	10,4	7,2	70,8	75,7	7
нач		9	16,1	21,9	22,7	21,3	18,0	20,6	18,2	10,4	000,0	7,2	66,1	71,9	7
нач		10	5,5	15,7	27,6	13,9	16,1	22,4	19,7	7,2	7,2	000,0	55,5	65,7	7
нач		11	000,0	61,3	64,7	66,3	67,4	72,6	73,2	70,8	66,1	55,5	000,0	11,3	1
нач		12	61,3	000,0	54,5	61,5	64,8	74,6	76,6	75,7	71,9	65,7	11,3	000,0	6
нач		13	64,7	54,5	000,0	57,0	61,5	71,6	74,8	75,2	72,7	67,6	14,7	4,5	00

Разработано: МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра МТ-3.

Рис. 5. Модуль данных для оптимизации

Нач	Кон		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
нач		1	000,0	11,3	14,7	16,3	17,4	22,6	23,2	20,8	16,1	5,5	50,0	61,3	6
нач		2	11,3	000,0	4,5	11,5	14,8	24,6	26,6	25,7	21,9	15,7	61,3	50,0	5
нач		3	14,7	4,5	000,0	7,0	11,5	21,6	24,8	25,2	22,7	17,6	64,7	54,5	5
нач		4	16,3	11,5	7,0	000,0	6,2	12,8	20,6	22,4	21,3	13,9	66,3	61,5	5
нач		5	17,4	14,8	11,5	6,2	000,0	6,7	14,6	17,4	18,0	16,1	67,4	64,8	6
нач		6	22,6	24,6	21,6	17,8	6,7	000,0	10,4	18,3	20,6	22,4	72,6	74,6	7
нач		7	23,2	26,6	24,8	20,6	14,6	10,4	000,0	10,5	18,2	19,7	73,2	76,6	7
нач		8	20,8	25,7	25,7	22,4	17,4	18,3	10,4	000,0	10,4	7,2	70,8	75,7	7
нач		9	16,1	21,9	22,7	21,3	18,0	20,6	18,2	10,4	000,0	7,2	66,1	71,9	7
нач		10	5,5	15,7	27,6	13,9	16,1	22,4	19,7	7,2	7,2	000,0	55,5	65,7	7
нач		11	000,0	61,3	64,7	66,3	67,4	72,6	73,2	70,8	66,1	55,5	000,0	11,3	1
нач		12	61,3	000,0	54,5	61,5	64,8	74,6	76,6	75,7	71,9	65,7	11,3	000,0	6
нач		13	64,7	54,5	000,0	57,0	61,5	71,6	74,8	75,2	72,7	67,6	14,7	4,5	00

Оптимальная последовательность переходов

Оптимальная последовательность переходов:

8 > 7 > 6 > 5 > 4 > 3 > 2 > 1 > 10 > 9

19 > 18 > 20 > 11 > 12 > 13 > 14 > 15 > 16 > 17

31 > 30 > 29 > 32 > 36 > 35 > 34 > 33 > 23 > 22

21 > 24 > 28 > 27 > 26 > 25

Время: 45.0 секунд

Разработано: МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра МТ-3.

Рис. 6. Результат оптимизации

Следует отметить, что разработанная программа, следуя принципу оптимальности Беллмана, позволяет также находить оптимальную последовательность обработки поверхностей, расположенных в пределах одной стороны детали по заданным чертежом геометрическим планам обработки сторон, где время на переход от обработки i -той поверхности к j -той задано матрицей $t' \{i, j\}$. В этом случае в ЭВМ вводится набор матриц $t' \{i, j\}$, число которых равно числу обрабатываемых сторон детали. ЭВМ формирует, с учетом технологических ограничений оптимальную последовательность обработки в пределах одной стороны детали, затем эта информация служит исходной для составления матрицы затрат $t \{i, j\}$ на оптимизацию последовательности обработки всей детали. Причем, известные уже начало и конец обработки в пределах одной стороны, необходимые для дальнейших расчетов, учитываются ограничениями -2. Результаты расчета по программе позволяют сделать вывод, что предложенная методика нахождения оптимальной последовательности обработки поверхностей корпусных деталей сокращает вспомогательное время до 20% по сравнению с существующими вариантами обработки.

Заключение

1. Для оптимизации последовательности обработки плоскостей и взаимосвязанных с ними других поверхностей нужно применять разработанную методику, в основу которой положен принцип оптимальности Беллмана. Принцип Беллмана утверждает, что если некоторая функция качества имеет вид аддитивного функционала, то конечный отрезок оптимальной траектории - оптимален.

2. Разработанная методика оптимизации последовательности обработки поверхностей должна учитывать технологические правила построения операций, которые резко сокращают размерность решаемой задачи для любой компоновки станков с пятью управляемой системой координат [9].

3. Для обоснованного расчета оптимального варианта станочной операции необходимо построение взаимосвязанных математических моделей плана и оптимальной последовательности обработки поверхностей.

Список литературы

1. Маталин А.А., Дашевский Т.Б. Многооперационные станки. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.
2. Волчкевич Л.И. Автоматизация производственных процессов. М.: Машиностроение, 2007. 380 с.
3. Бурцев В.М., Васильев А.С., Гемба И.Н. и др. Технология машиностроения: учеб. для вузов. В 2 т. Т. 1 / под ред. А.М. Дальского, А.И. Кондакова. 3-е изд., испр. и перераб. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 478 с.
4. Холмогорцев Ю.П. Оптимизация процессов обработки отверстий. М.: Машиностроение, 1984. 184 с.

5. Зарубин В.М., Капустин Н.М., Павлов В.В. и др. Автоматизированная система проектирования технологических процессов механосборочного производства. М.: Машиностроение, 1979. 246 с.
6. Беллман Р. Применение динамического программирования к задаче о коммивояжере: пер. с англ. // Кибернетический сборник: сб. ст. Т. 9. М.: Мир, 1964. С. 219-228.
7. Кравченко И.И., Диланян Р.З. Оптимизация последовательности обработки поверхностей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1978. № 7. С. 178-183.
8. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2001. 944 с.
9. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 360 с.

Mathematical Optimal Sequence Model Development to Process Planes and Other Interconnected Surfaces of Complex Body Parts

I.I. Kravchenko^{1,*}, V.L. Kiselev¹

knig@yandex.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: technological preparation of production, case detail, multi-purpose machine, algorithm, mathematical model, group of surfaces and holes, the coordinate system, objective function performance, cost

Experience in application of multi-operational machines CNC (MOM CNC) shows that they are efficient only in case of significantly increasing productivity and dramatically reducing time-to-market cycle of new products. Most full technological MOM capabilities are revealed when processing the complex body parts. The more complex is a part design and the more is its number of machined surfaces, the more tools are necessary for its processing and positioning, the more is an efficiency of their application. At the same time, the case history of using these machines in industry shows that MOM CNC are, virtually, used mostly for technological processes of universal equipment, which is absolutely unacceptable. One way to improve the processing performance on MOM CNC is to reduce nonproductive machine time through reducing the mutual idle movements of the working machine. This problem is solved using dynamic programming methods, one of which is the solution of the traveling salesman problem (Bellman's method). With a known plan for treatment of all elementary surfaces of the body part, i.e. the known number of performed transitions, each transition is represented as a vertex of some graph, while technological links between the vertices are its edges. A mathematical model is developed on the Bellman principle, which is adapted to technological tasks to minimize the idle time of mutual idle movements of the working machine to perform all transitions in the optimal sequence. The initial data to fill matrix of time expenditures are time consumed by the hardware after executing the i -th transition, and necessary to complete the j -transition. The programmer fills in matrix cells according to known routing body part taking into account the time for part and table positioning, tool exchange, spindle and table approach to the working zone, and the time of table rotation, etc. The mathematical model was tested when machining the body part with 36 transitions on the MOM model MS 12-250 of horizontal spindle configuration. Due to optimization, up to 25% reduction of nonproductive machine time has been reached.

References

1. Matalin A.A., Dashevskii T.B. *Mnogooperatsionnye stanki* [Multioperational machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 320 p. (in Russian).
2. Volchkevich L.I. *Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov* [Factory automation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 380 p. (in Russian).
3. Burtsev V.M., Vasil'ev A.S., Gemba I.N. et al. *Tekhnologiya mashinostroeniya V 2 t. T. 1* [Engineering Technology. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011. 478 p. (in Russian).
4. Kholmogortsev Yu.P. *Optimizatsiya protsessov obrabotki otverstii* [Optimization of processing of holes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 184 p. (in Russian).
5. Zarubin V.M., Kapustin N.M., Pavlov V.V. et al. *Avtomatizirovannaya sistema proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov mekhanosborochnogo proizvodstva* [The automated system of designing of technological processes of mechanical assembly production]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 246 p. (in Russian).
6. Bellman R. Dynamic Programming Treatment of the Travelling Salesman Problem. *Journal of the ACM (JACM)*, 1962, vol. 9, is. 1, pp. 61-63. DOI: [10.1145/321105.321111](https://doi.org/10.1145/321105.321111)
7. Kravchenko I.I., Dilanyan R.Z. Optimizing the sequence of processing of surfaces. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1978, no. 7, pp. 178-183. (in Russian).
8. Dal'skii A.M., Suslov A.G., Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K., eds. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya. V 2 t. T. 1* [Handbook for Technologist and Machine Engineer. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 944 p. (in Russian).
9. Norenkov I.P. *Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya* [Fundamentals of CAD]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000. 360 p. (in Russian).