

УДК 621.91.01

ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТА ОБРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНЫХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ ТИПА “ОБРАБАТЫВАЮЩИЙ ЦЕНТР”

Рувимов Владимир Сергеевич

Студент 6 курса

Кафедра “Технология машиностроения”

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель: И.И.Кравченко

кандидат технических наук, доцент кафедры “Технология машиностроения”

1. Постановка задачи

1.1. Введение

В целях увеличения производительности универсальных станков, путем сокращения вспомогательного времени, они были оснащены ЧПУ; стремление к дальнейшему снижению основного и вспомогательного времени оказало влияние на улучшение конструкций станков и совершенствование систем программного управления. Это позволило обеспечить полную автоматизацию процесса обработки детали на одном станке. Такие станки получили название “обрабатывающие центры” или “многооперационные станки” [1].

В настоящее время в машиностроении осуществляется переход к созданию гибких автоматизированных производств на базе многоцелевых станков. Это позволяет более оперативно реагировать на требования рынка. Значительно более высокая стоимость многоцелевых станков, по сравнению с обычным универсальным оборудованием, обуславливает необходимость обеспечения их более высокой производительности [2].

1.2. Описание технологических возможностей современных многооперационных станков

Многоцелевые станки снабжаются револьверной головкой или специальным инструментальным магазином большой ёмкости (до 140 инструментов), осуществляющим автоматическую установку в шпиндель практически любого инструмента, требуемого для

обработки соответствующей поверхности детали. Смена инструмента в шпинделе производится в течение 3-5 секунд.

С помощью программного управления на этих станках осуществляется автоматическое перемещение заготовки вдоль трёх координатных осей и её вращение вокруг вертикальной оси поворотного стола (4 управляемые координаты). В ряде случаев эти станки снабжаются глобусным столом, имеющим, кроме вертикальной, ещё и горизонтальную ось вращения (5 управляемых координат), что делает возможным осуществлять полную обработку сложных корпусных деталей практически за один установ. Единственным видом работ, выполняемым вручную на этих станках, является сьем, установка и закрепление заготовки [1].

Технологические возможности обработки на многоцелевых станках чрезвычайно широки: они могут выполнять все виды работ, необходимых при обработке заготовок корпусных деталей. В частности, выполняются всевозможные виды фрезерных работ: фрезерование плоскостей, пазов, внутренних платиков, фрезерование по контуру и т. д. Также выполняются все виды работ, необходимых для обработки отверстий: сверление, рассверливание, зенкерование, растачивание, развертывание, нарезание резьбы, подрезка торцов бобышек, зенкование и т. д. При этом близкое расположение отверстий не является препятствием для обработки [2,3].

1.3. Методы увеличения производительности обработки деталей на многооперационных станках

Время обработки на станке делится на основное и вспомогательное технологическое время. Основные резервы вспомогательного времени на многоцелевых станках выбраны за счет совершенствования систем ЧПУ и программ для них. Дальнейшее повышение производительности возможно за счет применения современных режущих материалов и выбора экономически оптимальных режимов резания. Учитывая высокую стоимость многоцелевых станков, скорость резания должна быть существенно увеличена по сравнению с обычными универсальными станками. Повышенные расходы по инструменту и его более частая смена в инструментальном магазине могут быть перекрыты более высокой производительностью [2].

Существуют пути дальнейшего повышения производительности станков данного типа за счет сокращения вспомогательного времени. При увеличении числа переходов, выполняемых на станке за один установ, вопрос построения оптимального маршрута

обработки приобрел особую остроту. Производственные исследования показали, классические методы проектирования маршрута обработки заготовок, применяемые как для обычных станков, так и для станков с ЧПУ, для обрабатывающих центров не в полной мере учитывают их расширенные технологические возможности.

1.4. Методы построения маршрута механической обработки заготовок на многоцелевых станках

Рассмотрим несколько различных методов построения маршрута обработки заготовки на многоцелевом станке [1,2,3]. Предположим, что в корпусной детали имеется сторона, на которой необходимо обработать ряд отверстий (рис. 1). Крепежные отверстия сверлятся и зенкуются, отверстия в торцах сверлятся и в них нарезается резьба. По классической технологии обработка каждого отверстия осуществляется полностью по всем переходам, обеспечивающим требуемую точность размеров и формы. Все переходы выполняются при одном позиционировании детали относительно шпинделя станка. При завершении полной обработки одного отверстия осуществляется перемещение детали для обработки второго и т.д. Очевидно, что такой маршрут не оптимален, так как происходит слишком частая смена инструмента и время на его смену достигает 40% вспомогательного времени.

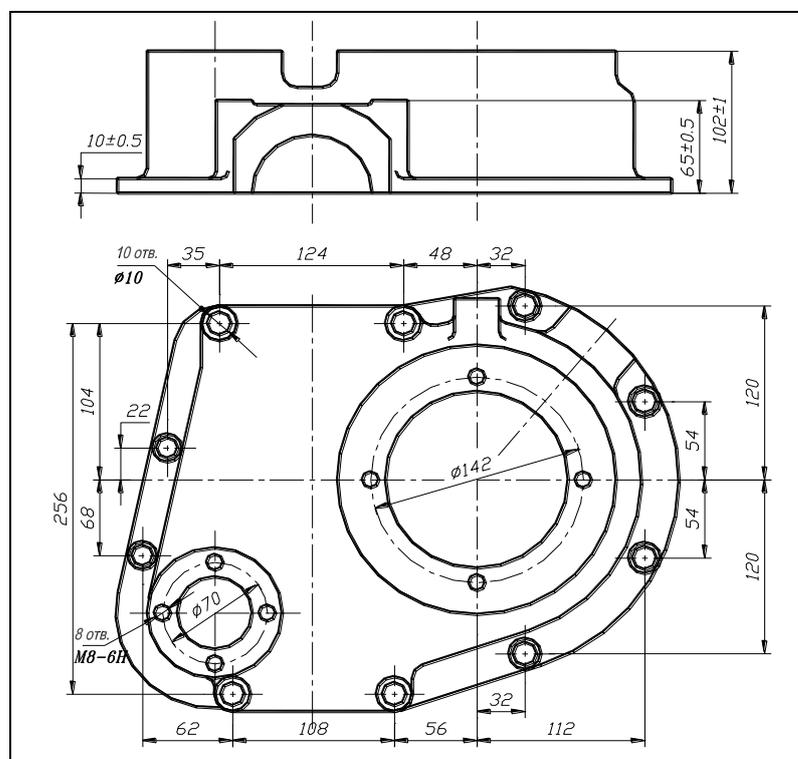


Рис. 1. Эскиз детали

Естественным дальнейшим шагом стала минимизация числа смен инструмента. Этот метод построения операции на многоцелевых станках заключается в разбиении отверстий на группы по диаметру. Сначала одним инструментом по первому переходу обрабатываются все отверстия одной группы, затем - смена инструмента и обработка по второму переходу и т. д. до полной обработки отверстий первой группы. Затем выполняют обработку следующей группы. При этом весь маршрут разбивается на маршруты обработки групп отверстий, которые в свою очередь разбиваются на ряд (по числу переходов) однотипных маршрутов.

Далее необходимо оптимизировать маршрут обработки множества отверстий каждой группы. В качестве целевой функции принимается время холостых перемещений. Требуется определить такую последовательность обработки отверстий в группе, при которой время холостых перемещений будет минимальным (то есть найти маршрут наименьшей протяжённости). Преимущество данного метода заключается в минимизации числа смен инструмента.

В настоящий момент время на смену инструмента в многоцелевых станках достигает 3..5 с., поэтому дальнейшим шагом на пути минимизации вспомогательного времени стала оптимизация всего процесса обработки. Теперь в качестве целевой функции принимается сумма времени холостых перемещений и времени смены инструмента.

1.5. Минимизация вспомогательного времени. Задача коммивояжера. Методы ее решения

Как говорилось выше, оптимизация всего процесса обработки – следующий шаг на пути минимизации вспомогательного времени. Рассмотрим подробнее задачу оптимизации.

На рис. 1 изображена деталь, в которой необходимо получить 18 отверстий. Каждое отверстие обрабатывается по двум переходам (сверление и зенкование или сверление и нарезание резьбы). Всего $18 \times 2 = 36$ переходов, каждый из которых назовем вершиной. Время, необходимое для перехода от одной вершины к другой, называют ребром.

Для существования маршрута обработки детали необходимо найти путь обхода всех вершин, причем посещение вершины возможно только один раз. Для получения оптимального маршрута необходимо минимизировать сумму ребер. Таким образом, задача оптимизации маршрута обработки сводится к известной задаче коммивояжера. Коммивояжер должен побывать в ряде городов. Известно время переезда между каждой парой городов. Необходимо выбрать самый непродолжительный замкнутый маршрут. Так

как число возможных маршрутов находится в факториальной зависимости от размерности задачи (числа вершин), то метод полного перебора вариантов для отыскания наилучшего неприменим. Если задачи малых размерностей можно решить опираясь на здравый смысл, то задачи больших размерностей требуют для своего решения строгого и систематического подхода. Аналитическое решение такой задачи не найдено, однако было предложено несколько вычислительных алгоритмов отыскания решения. Итеративный (шаговый) метод решения задачи коммивояжера, предложенный Литтлом, Мерти, Суини и Кэрелом называют также методом ветвей и границ [4]. Идея метода заключается в том, что множество всех допустимых маршрутов разбивается определенным образом на два непересекающихся подмножества и вычисляются оценки каждого из них. Далее подмножество с минимальной оценкой вновь разбивается на два подмножества, и вычисляются их оценки. Оценки вычисляются на каждом шаге, выбирается подмножество с наименьшей из всех полученных до этого шага оценок и разбивка продолжается. В итоге получают подмножество, содержащее один маршрут, который и будет оптимальным [2,4].

1.6. Ограничения, накладываемые технологией на задачу коммивояжера. Принцип Беллмана

Однако, при решении задачи, на этапе составления матрицы исходных данных, необходимо учитывать технологические ограничения, которые накладываются на классическую симметричную задачу коммивояжера. Так, например, невозможно зенкеровать отверстие, не просверлив его, поэтому ребро перехода от зенкерования к сверлению одного и того же отверстия следует считать бесконечным. Получается несимметричная задача коммивояжера, для решения которой метод ветвей и границ неприемлем.

В МГТУ им Н.Э. Баумана, на кафедре МТ-3, под руководством к.т.н., доцента Кравченко И.И., была проведена работа по построению математической модели. Решение модели основано на принципе Беллмана, который часто применяют для решения технологических сетевых задач.

Принцип Беллмана можно сформулировать следующим образом: “Если некоторая функция качества представлена в виде аддитивного функционала (суммы простых сумм), то конечный участок оптимальной траектории также оптимален” [2,4].

2. Выбор инструмента и технологического оборудования, используемого для обработки заготовки, выбранной в качестве примера

На данном этапе предлагается выбрать достаточно сложную деталь типа “корпус”. Для изготовления этой детали необходимо выбрать технологическое оборудование с ЧПУ для которого имеет смысл оптимизация последовательности переходов и минимизация вспомогательного времени. Затем следует выбрать инструмент для обработки всех поверхностей этой детали. Характеристики оборудования и данные об инструменте необходимы для составления массива исходных данных для оптимизации.

Для примера рассмотрим деталь, представленную на рис.1. Для обработки всех поверхностей этой детали требуется станок с вертикальным расположением шпинделя. Сравнивая существующие отечественные многооперационные станки по критерию минимальной стоимости станкоминуты, выбирается станок 2254ВМФ4, однако, если заменить фрезерование торцев крепёжных отверстий $\varnothing 12$ цекованием, то 2254ВМФ4 можно заменить на более дешёвый сверлильный станок с ЧПУ модели 1А135Ф3.

Для сверления всех необходимых отверстий выбираются свёрла спиральные комбинированные для обработки лёгких сплавов с цилиндрическим хвостовиком (так как обрабатываемые диаметры не превышают 12 мм) средней серии по ГОСТ19543-74. Для сверления крепёжных отверстий сверло $\varnothing 12$; для сверления отверстий под резьбу - сверла $\varnothing 7.25$ и $\varnothing 11$. Для цекования применяется цековка $\varnothing 20$.

Для нарезания резьб выбираются короткие машинные метчики с шейкой для метрической резьбы М8 и М12 по ГОСТ3266-81 [3].

3. Составление маршрутов обработки, согласно правилам построения маршрутов обработки для многоцелевых станков. Расчет вспомогательного времени

На основе правил, рассмотренных в пункте 1.4, составим маршруты обработки. При расчетах вспомогательного времени скорость холостых перемещения при позиционировании рабочего органа выбранного станка по всем координатам принималась равной 12000 мм/мин, а время, затрачиваемое автооператором на смену инструмента - 5 секунд. В таблице 2.1. указана нумерация каждого перехода. Это условное обозначение необходимо сравнения вариантов маршрутов обработки, а также для заполнения матрицы переходов.[2]

Таблица 2.1.

Обозначим:

Переходы	Обработка
1...10	Сверление $\varnothing 12H14$
11...20	Цекование $\varnothing 12H14$
21...24	Сверление $\varnothing 7.25$
25...28	Нарезание резьбы М8
29...32	Сверление $\varnothing 11$
33...36	Нарезание резьбы М12

Вариант, при котором каждое отверстие обрабатывается полностью по всем переходам при одном позиционировании рабочего органа, представлен в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Минимизация числа позиционирований.

Номер по порядку	Переходы	Номер по порядку	Переходы	Номер по порядку	Переходы
1	1	13	7	25	30
2	11	14	17	26	34
3	2	15	8	27	29
4	12	16	18	28	33
5	3	17	9	29	23
6	13	18	19	30	27
7	4	19	10	31	24
8	14	20	20	32	28
9	5	21	32	33	21
10	15	22	36	34	25

11	6	23	31	35	22
12	16	24	35	36	26
Суммарное вспомогательное время с учётом смены инструмента : 186 сек.					

Далее составляется вариант маршрута обработки, например, сначала одним инструментом сверлят все отверстия $\varnothing 12$, затем - смена инструмента и цекование этих отверстий, затем - смена инструмента - сверление следующей группы и т.д. При этом происходит минимизация количества смен инструмента и суммарное вспомогательное время существенно сокращается по сравнению с предыдущим вариантом. Маршрут и суммарное вспомогательное время для этого варианта представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Минимизация числа смен инструмента.

Номер по порядку	Переходы	Номер по порядку	Переходы	Номер по порядку	Переходы
1	1	13	13	25	25
2	2	14	14	26	26
3	3	15	15	27	27
4	4	16	16	28	28
5	5	17	17	29	29
6	6	18	18	30	30
7	7	19	19	31	31
8	8	20	20	32	32
9	9	21	21	33	33
10	10	22	22	34	34

11	11	23	23	35	35
12	12	24	24	36	36
Суммарное вспомогательное время с учётом смены инструмента : 48 сек.					

4. Составление матрицы переходов. Подготовка данных для работы с ЭВМ

Согласно условию задачи коммивояжера, описанному в пункте 1.6. известно расстояние между каждой парой вершин. Поэтому составляется квадратная матрица со стороной равной числу переходов (в нашем случае 36). В ячейках указывается суммарное время перемещения шпинделя станка от позиции I (номер строки) к позиции J (номер столбца) и смены инструмента (если требуется). Расстояние между обработками берется с чертежа детали, а скорость холостых перемещений в паспорте станка.

При составлении матрицы переходов следует учитывать ограничения, накладываемые технологией на классическую симметричную задачу коммивояжера. Эти ограничения были рассмотрены в пункте 1.6.

В таблице 2.5. показан фрагмент матрицы исходных данных, необходимых для оптимизации маршрута обработки детали, показанной на рис. 1. Нулем в данном случае обозначено ребро бесконечной длины - запрещенный переход.

Таблица 2.5. Фрагмент матрицы переходов

№ пер.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	11,3	14,7	16,3	17,4	22,6	23,2	20,8	16,1	5,5	50	61,3	64,7	66,3
2	11,3	0	4,5	11,5	14,8	24,6	26,6	25,7	21,9	15,7	61,3	50	54,5	61,5
3	14,7	4,5	0	7	11,5	21,6	24,8	25,7	22,7	27,6	64,7	54,5	50	57
4	16,3	11,5	7	0	6,2	12,8	20,6	22,4	21,3	13,9	66,3	61,5	57	50

5	17,4	14,8	11,5	6,2	0	6,7	14,6	17,4	18	16,1	67,4	64,8	61,5	56,2
6	22,6	24,6	21,6	12,8	6,7	0	10,4	18,3	20,6	22,4	72,6	74,6	71,6	62,8
7	23,2	26,6	24,8	20,6	14,6	10,4	0	10,5	18,2	19,7	73,2	76,6	74,8	70,6
8	20,8	25,7	25,7	22,4	17,4	18,3	10,5	0	10,4	7,2	70,8	75,7	75,2	72,4
9	16,1	21,9	22,7	21,3	18	20,6	18,2	10,4	0	7,2	66,1	71,9	72,7	71,3
10	5,5	15,7	27,6	13,9	16,1	22,4	19,7	7,2	7,2	0	55,5	65,7	67,6	63,9
11	50	61,3	64,7	66,3	67,4	72,6	73,2	70,8	66,1	55,5	0	11,3	14,7	16,7
12	61,3	50	54,5	61,5	64,8	74,6	76,6	75,7	71,9	65,7	11,3	0	4,5	11,5
13	64,7	54,5	50	57	61,5	71,6	74,8	75,2	72,7	67,6	14,7	4,5	0	7
14	66,3	61,5	57	50	56,2	62,8	70,6	72,4	71,3	63,9	16,7	11,5	7	0

5. Работа с вычислительными машинами

5.1. Программа, реализующая алгоритм решения задачи коммивояжера

На основе алгоритма, реализующего принцип Беллмана (смотри пункт 1.6.), были написаны программа Bellman, Bellman 2.0 и некоторые дополнительные сервисные модули.

5.2. Методы эффективной работы с программой и уменьшения трудоемкости ввода исходных данных для оптимизации

Рассмотрим подробнее приемы работы и возможности этого Windows-приложения: При запуске исполняемого файла Bellman 2.0.exe на экране появляется окно, которое, как и окно любого другого приложения, можно свернуть, развернуть во весь экран или изменить его геометрию так, как это будет удобно пользователю. Под заголовком окна расположено главное меню, состоящее из четырех пунктов, позволяющих выполнять все действия, необходимые для создания, редактирования, сохранения и считывания матрицы переходов. Ниже находятся кнопки для удобства работы с основными пунктами меню, указатели текущей размерности матрицы и текущей позиции курсора. В рабочем поле

окна расположены две таблицы, содержащие матрицы возможных начал и окончаний технологического процесса и матрицу переходов. По умолчанию размерность матрицы 1×1. Заполнение матрицы может производиться вручную по данным матрицы переходов или с помощью модуля, формирующего матрицу по данным, полученным с чертежа детали.

Перед началом заполнения матриц вручную необходимо задать размерность решаемой задачи. Для этого в меню “Файл” выбирается пункт “Размерность” и в появившемся диалоговом окне указывается размерность задачи в диапазоне от 1 до 1000 переходов (в нашем случае 36). При этом в рабочем поле окна появляются пустые таблицы, указанной размерности. Если размер таблиц превышает размеры рабочего поля окна, то на нижней и правой границе рабочего поля появляются полосы прокрутки. Доступ к любой части таблицы может осуществляться как с помощью клавиш управления курсоров, так и с помощью полос прокрутки.

Время в ячейки таблицы нужно вводить в секундах с точностью до одного знака после запятой. Например, чтобы ввести время перехода с 21-й вершины на 1-ю (53,0 секунды), нужно курсор перенести в позицию 21:01 с помощью стрелок или указателя мыши. При установке курсора в ячейку таблицы он принимает вид маски ввода “_.,_”. Маска ввода настроена таким образом, что пользователь не сможет ввести других символов, кроме цифр и десятичной запятой. Ввод при этом может осуществляться как с основной, так и с дополнительной клавиатуры - при русской или английской раскладке клавиатуры. Это позволяет снизить количество ошибок при заполнении матрицы. Нулевое значение, например позиция 11:1, обозначает технологический запрет, то есть такой переход невозможен. Значения, расположенные на главной диагонали матрицы, например позиция 5:5, не подлежат редактированию и установлены нулевыми, поскольку по условию задачи каждая вершина посещается один раз.

Для правильной работы программы необходимо, также, указать возможные начала и окончания технологического процесса обработки детали. Это делается следующим образом: необходимо переместить указатель мыши в соответствующую ячейку таблиц начал и окончаний и щелкнуть левой кнопкой мыши. Повторный щелчок снимет отметку. Возможен также случай, когда технологический переход может являться одновременно и началом и концом техпроцесса. Такие переходы помечаются двумя отметками.

Сохранение матрицы осуществляется выбором пункта “Сохранить” или “Сохранить как...” в меню “Файл”, щелчком мыши по соответствующей кнопке на панели

управления или нажатием комбинации клавиш (таблица 3.1.). При этом появляется стандартное диалоговое окно, позволяющее сохранить файл на любой локальный или сетевой диск. По умолчанию файл имеет расширение “.mtr”.

Таблица 5.1. “Горячие” клавиши

№	Действие	Комбинация клавиш при раскладке клавиатуры	
		Русской	Английской
1	Открыть файл	Alt-N	Alt-N
2	Сохранить файл	Alt-C	Alt-S
3	Сохранить файл как...	Alt-K	Alt-A
4	Печатать...	Alt-П	Alt-P
5	Установить размерность...	Alt-P	Alt-D
6	Открыть MS Excel	Alt-E	Alt-E
7	Запустить сервисный модуль	Alt-M	Alt-M
8	Тестировать	Alt-T	Alt-T
9	Оптимизировать	Alt-O	Alt-O
10	Помощь	Alt-X	Alt-H

По желанию пользователя матрица переходов может заполняться в MS Excel. Написав соответствующий макрос можно значительно сократить объем работ. Для запуска MS Excel, если такая программа установлена на компьютере, в меню “Сервис” имеется пункт “Запустить Excel”. После заполнения матрицы она сохраняется как форматированный текст и это файл может быть открыт из программы Bellman 2.0. Формат файла, содержащего матрицу перехода, создаваемого Bellman 2.0, совместим с форматом Excel, что позволяет работать с одним файлом в обеих программах (см. рис. 2).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		36						
3	нач	нач						
4								
5	0	11,3	14,7	16,3	17,4	22,6	23,2	
6	11,3	0	4,5	11,5	14,8	24,6	26,6	
7	14,7	4,5	0	7	11,5	21,6	24,8	
8	16,3	11,5	7	0	6,2	12,8	20,6	
9	17,4	14,8	11,5	6,2	0	6,7	14,6	
10	22,6	24,6	21,6	17,8	6,7	0	10,4	
11	23,2	26,6	24,8	20,6	14,6	10,4	0	
12	20,8	25,7	25,7	22,4	17,4	18,3	10,4	
13	16,1	21,9	22,7	21,3	18	20,6	18,2	
14	5,5	15,7	27,6	13,9	16,1	22,4	19,7	

Рис. 2. Заполнение матрицы переходов в MS Excel

Еще один альтернативный способ формирования матрицы переходов предоставляет пользователю модуль заполнения матрицы по данным, полученным с чертежа детали. Запустить данный модуль можно выбрав пункт “Ввод данных с чертежа” из меню “Сервис”. Далее предлагается выбрать файл, содержащий параметры оборудования из библиотеки, либо определить их вручную, т. е. создать файл библиотеки, в котором будут содержаться некоторые технические характеристики многоцелевого станка, на котором будет обрабатываться заготовка корпусной детали.

Задав число обрабатываемых элементарных поверхностей, пользователь для каждой из них вводит диаметр (или протяженность, если обработка плоскости), качество, число переходов для получения заданной точности обработки и координаты. Этой информации достаточно для заполнения матрицы переходов. Применение данного модуля сокращает время формирования матрицы переходов на 40...50%.

5.3. Оптимизация. Получение оптимального маршрута и минимального вспомогательного времени обработки детали

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	4
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	0

Рис. 3. Исходные данные для оптимизации

После окончания заполнения матрицы (рис. 3) из меню “Оптимизировать” выбирается пункт “Начать” для того, чтобы запустить процесс оптимизации. При этом на экране появляется окно с индикатором выполнения процесса. Если матрица заполнена неверно или не полностью, то оптимизация прервется и появится окно с сообщением об ошибке. После успешного окончания процесса оптимизации появляется окно, в котором показывается оптимальная последовательность переходов и суммарное время холостых перемещений и смены инструмента (рис. 4).

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	4
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	0

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

Рис. 4. Результат оптимизации

6. Выводы

Результаты работы программы Bellman 2.0 сведены в таблицу 4.1. Анализируя данные, представленные в таблицах 2.2, 2.3 и 4.1, становится видно, что из всех вариантов маршрута обработки вариант, полученный с помощью программы оптимизации имеет минимальное суммарное вспомогательное время. Очевидно, что при оптимизации обработки более сложных деталей с большим числом элементарных поверхностей, расположенными в разных плоскостях выигрыш по времени составит больший процент, чем в рассмотренном примере. Тем не менее, даже оптимизируя обработку достаточно простой детали, рассмотренной в примере, уменьшение суммарного вспомогательного времени с учетом смены инструмента составит около 6%. Учитывая высокую стоимость станкоминуты работы многооперационных станков, следует признать, что незначительные затраты на стадии технологической подготовки производства по оптимизации программ для этих станков легко перекроются этой экономией. Также наметились тенденции интегрирования подобных оптимизационных программ в “тяжелые” пакеты автоматизированного проектирования.

Таблица 4.1. Оптимальная последовательность переходов.

Номер по порядку	Переходы	Номер по порядку	Переходы	Номер по порядку	Переходы
1	8	13	20	25	36
2	7	14	11	26	35
3	6	15	12	27	34
4	5	16	13	28	33
5	4	17	14	29	23
6	3	18	15	30	22
7	2	19	16	31	21
8	1	20	17	32	24

9	10	21	31	33	28
10	9	22	30	34	27
11	19	23	29	35	26
12	18	24	32	36	25
Суммарное вспомогательное время с учётом смены инструмента : 45 сек.					

Литература

1. Технология машиностроения: учебн. для вузов: в 2т. / ; под ред. А.М. Дальского, А.И. Кондакова. – 3-е изд., испр. и перераб. –М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
2. Автоматизированная система проектирования технологических процессов механосборочного производства/В. М. Зарубин, Н. М. Капустин, В. В. Павлов, Г. П. Старовойтов, В. Д. Цветков. — М.: Машиностроение, 1979. — 247 с., ил.
3. Справочник технолога машиностроителя. В 2т. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К.Мещерякова. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2001. Т.1. — 912 с.; Т.2. 944с.
4. Акоф Р., Сасиени М. Основы исследования операций/ Пер. с англ. М., Мир, 1999. - 536 с.