

ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ СИНТЕЗ ВАРИАНТОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ

Представлений способ опису обмежень послідовності виконання технологічних переходів обробки отворів у виді відповідних матриць та графів. Показано, як запропонований опис може бути використаний для формалізованого синтезу варіантів послідовності обробки отвору. Дані принципи виділення з технологічно довільних порядків обробки економічно переважних. Наведено опис нового програмного забезпечення, що реалізує пропонувані моделі та процедури для автоматизації синтезу частини технологічної операції.

Представлений способ опису обмежень послідовності виконання технологічних переходів обробки отворів у виді відповідних матриць та графів. Показано, як запропонований опис може бути використаний для формалізованого синтезу варіантів послідовності обробки отвору. Дані принципи виділення з технологічно довільних порядків обробки економічно переважних. Наведено опис нового програмного забезпечення, що реалізує пропонувані моделі та процедури для автоматизації синтезу частини технологічної операції.

Для современного машиностроительного производства характерно стремление к получению наибольших прибылей и к постоянному обновлению ассортимента выпускаемой продукции. Такое производство носит название многоцелевого. Требования многоцелевого производства могут быть реализованы в условиях компьютерно-интегрированного производства [1] охватывающего все этапы жизненного цикла изделия. Гибкая производственная система должна обладать легко изменяющейся структурой, а входящее в ее состав оборудование – широкими возможностями. Эффективно использовать ресурс такого производства можно только в сочетании с эффективными технологическими процессами, синтез которых возможен с использованием соответствующих систем автоматизированного проектирования [2].

Формальное описание объектов и процессов проектирования технологии механической обработки возможно с использованием подходов, представленных в [3].

Математическое моделирование позволяет раскрывать функции проектирования $G(P, Q)$ через функции описания состояния, которые в процессе проектирования образуют последовательность, и функции перехода от одного состояния к другому.

Функция проектирования технологии представляет собой кортежи, образованные функциями решения отдельных технологических задач:

$$G = \langle F_1^*, F_2^*, \dots, F_n^* \rangle \quad (1)$$

Каждая функция решения задач представляет собой кортеж функции описания состояния и функции перехода

$$F_i = \langle Q_0^i, P_0, Q_1^i, P_1, \dots, Q_{v-1}^i, P_{v-1}, Q_v^i \rangle \quad (2)$$

Функция перехода – функция преобразования одного описания состояния Q_i^j в другое описание Q_{i+1}^j и, по определению, $P = f(Q_i^j, Q_{i+1}^j)$. Содержание функции описания состояний установлено из взаимосвязанных

законов функционирования производства и технологии. Первые рассматривают законы управления, экономики и взаимодействия объектов производства. Вторые рассматривают законы физического и химического изменения состояния объектов и взаимодействия объектов технологии. Таким образом, функции описания состояний определяют взаимодействия элементов технологии и производства, образующих проект, проектное решение, обусловленные целевой установкой технологического процесса и конструкцией средств оснащения; в пространстве состояния H процесса проектирования Q есть функция от $H(Q = f(H))$.

Технологические ограничения порядков выполнения технологических переходов обработки отверстий.

В общем случае, если рассматривать Q_i^j как состояния заготовки в процессе обработки, то для обработки отверстия может быть установлен типовой набор технологических переходов [4] для которых введем следующие обозначение (табл. 1)

Для переходов обработки отверстий можно выделить два случая их бинарного взаимодействия.

1. *Отсутствие ограничения последовательности* – если переход P_i не ограничивает последовательность выполнения перехода P_j , а переход P_j не ограничивает последовательность выполнения перехода P_i . Такой случай можно назвать *технологически произвольным*. Например (рис. 1, а), можно сначала сверлить, а затем фрезеровать,

либо сначала фрезеровать, а затем сверлить. Условие технологической произвольности может быть записано следующим образом:

$$P_i \vee P_j \Leftrightarrow P_j \vee P_i \quad (3)$$

2. *Наличие ограничения последовательности* – если переход P_i ограничивает последовательность выполнения перехода P_j , Такой случай можно назвать *технологически детерминированным*. Например (рис. 1, б), возможна только такая последовательность: сверлить, затем – зенковать. Условие технологической предопределенности может быть записано следующим образом:

$$P_i \wedge P_j \Leftrightarrow \overline{P_j \wedge P_i} \quad (4)$$

Таблица 1

Обозначение технологических переходов обработки отверстия		
Обозначение	Содержание технологического перехода	Возможные средства реализации
P_1	Центрирование	Выполнение специальным центровым инструментом, сверлом или конусной зенковкой
P_2	Черновая обработка отверстия	Может быть выполнена за один или несколько проходов сверлами, зенкерами, резцами и фрезами
P_3	Обработка торца отверстия	Выполняется прямой зенковкой, торцовой пластиной или фрезой, а также резцами, установленными в планшуппоре
P_4	Коническое зенкерование	Выполняется специальным коническим зенкером
P_5	Прямое зенкование	Этот переход может осуществляться с направляющей цапфой, зенкером для глухих отверстий или резцом для глухих отверстий на борштанге и в планшуппоре
P_6	Коническое зенкование	Переход для обработки фасок, выполняемый конусной зенковкой, сверлом или резцом
P_7	Резьбонарезание	Выполняется метчиками для сквозных и глухих отверстий
P_8	Получистовая обработка отверстия	Производится зенкерами или резцами для глухих и сквозных отверстий, включая планшуппортную обработку
P_9	Обработка канавки	Этот переход выполняют или планшуппортом, или вручную
P_{10}	Чистовая обработка	Выполняют развертками или резцами для сквозных или глухих отверстий, включая планшуппортную обработку

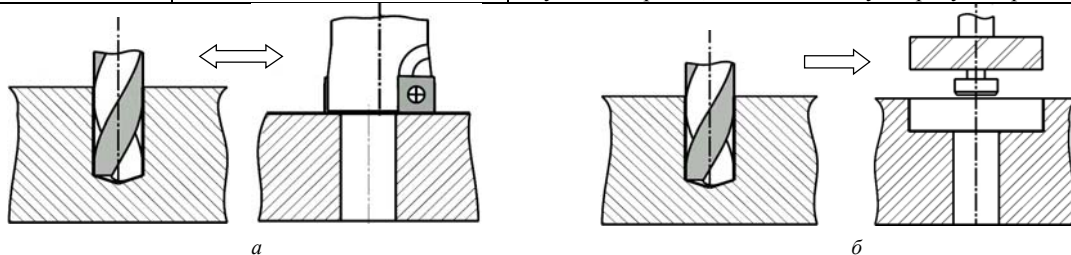


Рис. 1. Иллюстрация технологически произвольного (а) и технологически предопределенного (б) порядков выполнения технологических переходов

В зависимостях (3-4) символ « \wedge » обозначает жесткий порядок выполнения технологических переходов, а символ « \vee » – произвольный. В соответствии с (3) наличие возможности выполнения последовательности « $P_i \rightarrow P_j$ » автоматически свидетельствует о возможности выполнения последовательности « $P_j \leftarrow P_i$ ». В соответствии с (4) наличие жесткого ограничения последовательности « $P_i \rightarrow P_j$ » автоматически свидетельствует о невозможности выполнения последовательности « $P_j \leftarrow P_i$ ». Анализ всех возможных сочетаний переходов из табл. 1 можно свести в матрицу (а) или граф (б) *ограничения последовательности выполнения переходов обработки отверстий* (ОПВПО) – (рис. 2).

В матрице ОПВПО (рис.2, а) наличие «1» на пересечении i -й строки и j -го столбца обозначает, что технологический переход F_j не может быть выполнен перед технологическим переходом P_i . Наличие «0» в этой же позиции обозначает, что выполнение технологического перехода P_j не зависит от выполнения технологического перехода P_i . В матрице ОПВПО имеются два варианта сочетаний данных условий: $M_{ij} = M_{ji}$ и $M_{ij} \neq M_{ji}$. Первый случай (соответствующие ячейки в матрице ОПВПО выделены серым фоном) соответствует технологически произвольному порядку выполнения пары технологических переходов (см. пример на рис. 1, а), второй случай соответствует технологически детерминированному порядку (см. пример на рис. 1, б).

Отсутствие в графе ОПВПО связей между вершинами P_i и P_j свидетельствует о произвольном порядке выполнения пары технологических переходов, т.е. $P_i \leftrightarrow P_j$ (см. пример на рис.1, а). Наличие в графе ОПВПО дуги, исходящей из вершины P_i и входящей в вершину P_j свидетельствует о технологически детерминированном порядке выполнения технологических переходов, а именно, $P_i \rightarrow P_j$ – технологический переход P_j должен выполняться после технологического перехода P_i (см. пример на рис.1, б).

Данное представление является наиболее общим случаем, включающим весь набор переходов, из которого можно получить любые частные случаи для конкретных отверстий.

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
P_1	-	1	0	1	1	1	1	1	1	1
P_2	0	-	0	1	1	1	1	1	1	1
P_3	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0
P_4	0	0	0	-	0	0	1	1	0	1
P_5	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
P_6	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0
P_7	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0
P_8	0	0	0	0	0	0	1	-	0	1
P_9	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0
P_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-

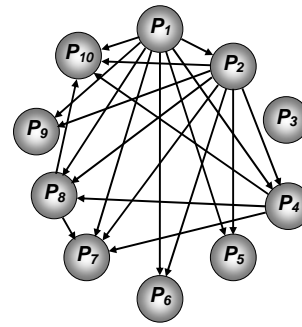
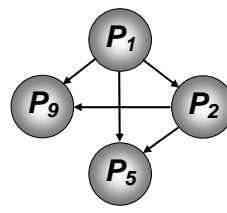
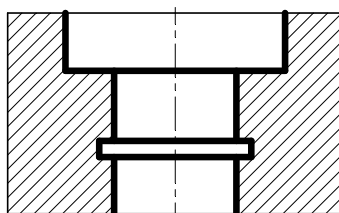


Рис. 2. Представление ОПВПОО: а – в виде матрицы; б – в виде графа

Так, например, для обработки отверстия (рис. 3, а) необходим следующий набор технологических переходов: P_1 – центрирование, P_2 – сверление, P_5 – прямое зенкование и P_9 – обработка канавки. Соответствующий граф ОПВПОО, являющаяся частным случаем общего графа ОПВПОО (рис. 2, а), представлена на рис. 3, б, а матрица ОПВПОО, являющаяся частным случаем общей матрицы ОПВПОО (рис. 2, б), представлена на рис. 3, в.



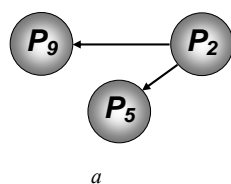
	P_1	P_2	P_5	P_9
P_1	--	1	1	1
P_2	0	--	1	1
P_5	0	0	--	0
P_9	0	0	0	--

Рис. 3. Пример использования для описания технологических переходов обработки отверстия (а) графа (б) и матрицы (в) ОПВПОО

Синтез вариантов последовательности обработки отверстий. Имея набор технологических переходов, необходимых для обработки конкретного отверстия, описанный в виде матрицы или графа ОПВПОО может быть сведен к циклическому выполнению двух этапов:

1. поиску на графе ОПВПОО вершин(ы), не имеющих входящих дуг, либо в матрице ОПВПОО столбцов(-ец), имеющих только нулевые элементы;
2. исключению из графа ОПВПОО найденных вершин(ы) и всех принадлежащих ей дуг, либо в матрице ОПВПОО исключения строк и столбцов, индекс которых соответствует индексу найденных переходов(-а).

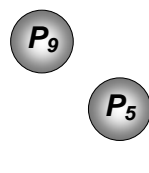
Для рассматриваемого примера (рис. 3) на первом цикле условию этапа 1 соответствует переход P_1 – центрирование, который и должен выполняться первым. Граф ОПВПОО и матрица ОПВПОО, полученные как результат реализации этапа 2 показаны на рис. 4.



	P_2	P_5	P_9
P_2	--	1	1
P_5	0	--	0
P_9	0	0	--

Рис. 4. Граф (а) и матриц (б) ОПВПОО, полученные после исключения перехода P1

На втором цикле условию этапа 1 соответствует переход P_2 – сверление, который и должен выполняться вторым. Граф ОПВПОО и матрица ОПВПОО, полученные как результат реализации этапа 2 показаны на рис. 5.



	P_5	P_9
P_5	--	0
P_9	0	--

Рис. 5. Граф (а) и матриц (б) ОПВПОО, полученные после исключения перехода P2

Дальнейшее применение условия этапа 1 свидетельствует о равной возможности выполнения переходов P_5 и P_9 , что позволяет записать логическую формулу последовательностей обработки отверстия – $P_1 \wedge P_2 \wedge (P_5 \vee P_9)$ и синтезировать два варианта последовательностей: $(P_1 \wedge P_2 \wedge P_5 \wedge P_9) \vee (P_1 \wedge P_2 \wedge P_9 \wedge P_5)$. Учет вариантов последовательности обработки в современных системах управления производственными потоками [5,6] позволяет повысить загрузку оборудования в пределах цеха или участка.

Выделение экономически предпочтительных вариантов обработки. Представленный выше способ описания ОПВПОО и алгоритм его анализа позволяют синтезировать все технологически допустимые варианты обработки. В то же время, очевидно, что с точки зрения приоритета выполнения технологических переходов, допускающих произвольный порядок, можно выделить экономически предпочтительные варианты, обеспечивающие большую производительность. Т.е. от условия $P_i \xrightarrow{\leftarrow} P_j$ перейти к условию $(P_i \xrightarrow{\leftarrow} P_j) \vee (P_i \xrightarrow{\rightarrow} P_j)$, где символ $\xrightarrow{\rightarrow}$ будет обозначать экономически предпочтительную (приоритетную) последовательность выполнения технологических переходов. Выделение таких предпочтительных вариантов определяется как объективными факторами, так и субъективными факторами, которые зависят от уровня развития конкретного предприятия. Основным критерием в проектировании технологических процессов механообработки является максимум производительности. Остановимся на некоторых примерах объективного выделения экономически предпочтительных вариантов.

Для вариантов обработки ступенчатого отверстия однотипным инструментом (сверлами различного диаметра) (рис. 6) с учетом рекомендаций производителей режущего инструмента [7-9] и ограничений по частоте вращения и подаче [10], рассчитываем временные и энергетические затраты для двух вариантов (см. табл. 2).

Таблица 2

Расчет основных технико-экономических показателей для вариантов обработки

Этап и расчетная зависимость	Для схемы А		Для схемы Б	
	Переход P_1	Переход P_2	Переход P_1	Переход P_2
Рекомендованная скорость резания V_r (м/мин)	$V_1 = 140$ (м/мин)	$V_2 = 130$ (м/мин)	$V_1 = 130$ (м/мин)	$V_2 = 140$ (м/мин)
Расчетная частота вращения, n , (об/мин) $n = \frac{V \cdot 1000}{\pi \cdot D}$	$n_1 = \frac{140 \cdot 1000}{3,14 \cdot 12} = 3715$ (об/мин) [n]=2500 об/мин	$n_2 = \frac{130 \cdot 1000}{3,14 \cdot 6} = 6900$ (об/мин) [n]=2500 об/мин	$n_1 = \frac{130 \cdot 1000}{3,14 \cdot 6} = 6900$ (об/мин) [n]=2500 об/мин	$n_2 = \frac{140 \cdot 1000}{3,14 \cdot 12} = 3715$ (об/мин) [n]=2500 об/мин
Площадь срезаемого слоя, A_T , (мм ²) $A_T = \frac{\pi(D_{св}^2 - D_{от}^2)}{4}$	$A_{T,1} = \frac{3,14(12^2 - 0^2)}{4} = 113,04$ (мм ²)	$A_{T,2} = \frac{3,14(6^2 - 0^2)}{4} = 28,26$ (мм ²)	$A_{T,1} = \frac{3,14(6^2 - 0^2)}{4} = 28,26$ (мм ²)	$A_{T,2} = \frac{3,14(12^2 - 6^2)}{4} = 84,78$ (мм ²)
Расчетная фактическая скорость резания, V_f (м/мин) $V_f = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$	$V_{f,1} = \frac{3,14 \cdot 12 \cdot 2500}{1000} = 94,2$ (м/мин)	$V_{f,2} = \frac{3,14 \cdot 6 \cdot 2500}{1000} = 47,1$ (м/мин)	$V_{f,1} = \frac{3,14 \cdot 6 \cdot 2500}{1000} = 47,1$ (м/мин)	$V_{f,1} = \frac{3,14 \cdot 12 \cdot 2500}{1000} = 94,2$ (м/мин)
Рекомендуемая подача, f , (мм/об)	$f_1 = 0,33$ мм/об	$f_2 = 0,19$ мм/об	$f_1 = 0,19$ мм/об	$f_2 = 0,66$ мм/об
Расчетная подача, F , (мм/мин) $F = f \cdot n$	$F_1 = 0,33 \cdot 2500 = 825$ (мм/мин)	$F_2 = 0,19 \cdot 2500 = 475$ (мм/мин)	$F_1 = 0,19 \cdot 2500 = 475$ (мм/мин)	$F_2 = 0,66 \cdot 2500 = 1650$ (мм/мин)
Время обработки, T_C , мин $T_C = \frac{L}{F}$	$T_{C,1} = \frac{31}{825} = 0,038$ мин	$T_{C,2} = \frac{12}{475} = 0,025$ мин	$T_{C,1} = \frac{40}{475} = 0,084$ мин	$T_{C,2} = \frac{31}{1650} = 0,019$ мин
Суммарное время, T_C , мин $T_C = T_{C,1} + T_{C,2}$	$T_C = 0,063$ мин		$T_C = 0,103$ мин	
Скорость съема стружки, Q , (см ³ /мин) $Q = \frac{V_f \cdot A_T}{1000}$	$Q_1 = \frac{94,2 \cdot 113,04}{1000} = 10,64$ (см ³ /мин)	$Q_2 = \frac{47,1 \cdot 28,26}{1000} = 1,33$ (см ³ /мин)	$Q_1 = \frac{47,1 \cdot 28,26}{1000} = 1,33$ (см ³ /мин)	$Q_2 = \frac{94,2 \cdot 84,78}{1000} = 7,98$ (см ³ /мин)
Мощность резания, P_C , (кВт) $P_C = \frac{Q}{60000 \cdot \eta} \cdot k_c \cdot \sin k$	$P_{C,1} = \frac{10,64}{60000 \cdot 0,85} \cdot 1800 \cdot 1 = 0,37$ кВт	$P_{C,2} = \frac{1,33}{60000 \cdot 0,85} \cdot 1800 \cdot 1 = 0,046$ кВт	$P_{C,1} = \frac{1,33}{60000 \cdot 0,85} \cdot 1800 \cdot 1 = 0,046$ кВт	$P_{C,2} = \frac{7,98}{60000 \cdot 0,85} \cdot 1800 \cdot 1 = 0,28$ кВт
Работа резания, S , (Дж) $S = P_C \cdot T_C$	$S_1 = 0,37 \cdot 0,032 = 0,0118$ Дж	$S_2 = 0,027 \cdot 0,046 = 0,0012$ Дж	$S_1 = 0,84 \cdot 0,046 = 0,00386$ Дж	$S_2 = 0,28 \cdot 0,016 = 0,0045$ Дж
Суммарная работа	$S = 0,013$ Дж		$S = 0,0084$ Дж	

Этап и расчетная зависимость	Для схемы А		Для схемы Б	
	Переход P ₁	Переход P ₂	Переход P ₁	Переход P ₂
S ₂ (Дж) S = S ₁ + S ₂				

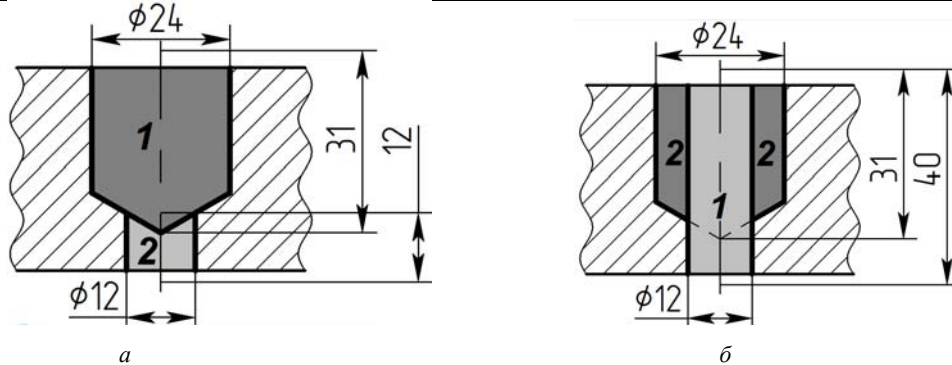


Рис. 6. Два варианта обработки ступенчатого отверстия: а – меньший диаметр после большего; б – больший диаметр после меньшего

Основные итоговые результаты по производительности и затратам энергии приведены на диаграммах (см. рис. 7).

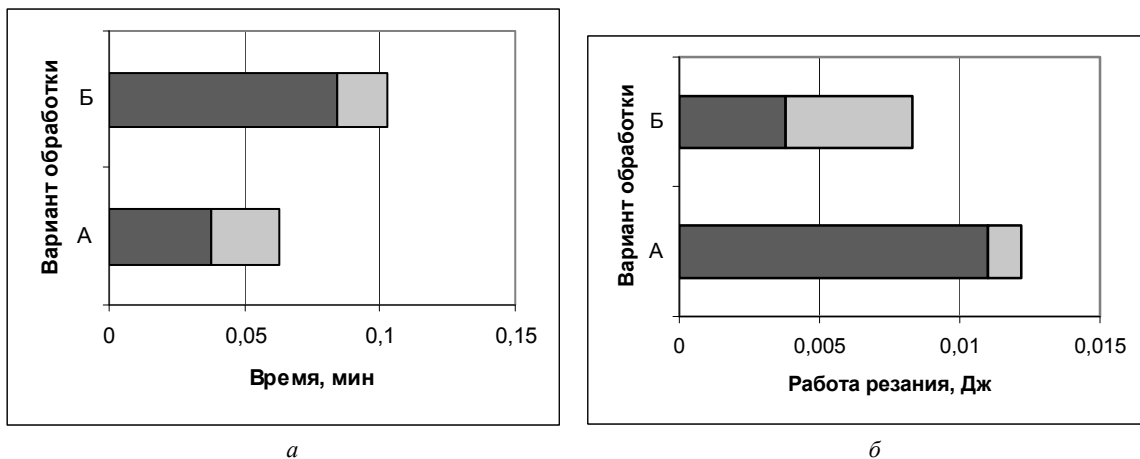


Рис. 7. Сравнение эффективности двух вариантов обработки: а – по критерию производительности; б – по критерию энергозатрат

Программное обеспечение для синтеза вариантов последовательности обработки. Эффективный учет вариативности последовательности обработки отверстий возможен на основе использования специализированного программного обеспечения, позволяющего в автоматизированном режиме синтезировать все технологически допустимые варианты обработки,

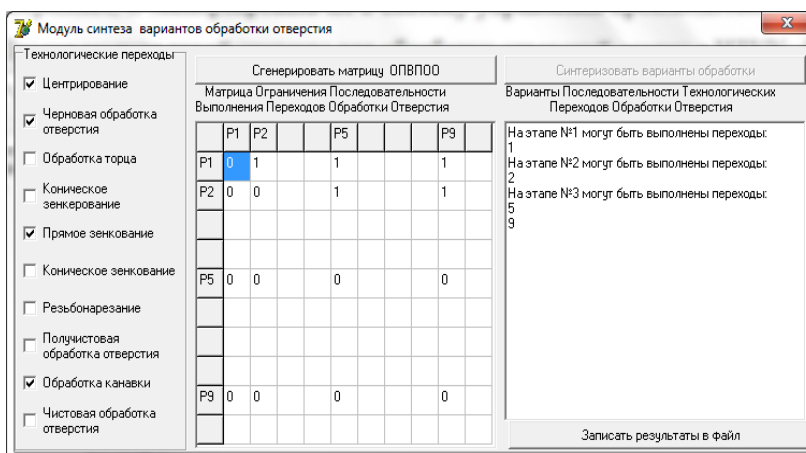


Рис. 8. Интерфейс модуля синтеза вариантов технологических переходов обработки отверстия

с последующим выделением из них экономически целесообразных, и экспортировать их в систему управления производственными заказами цеха. Проект модуля такой системы для обработки отверстий создан в НТУУ «КПИ». Модуль имеет однооконный интерфейс (рис. 8), условно разделенный на три зоны.

Первая зона (слева) позволяет определить набор технологических переходов, необходимых для обработки отверстия. Модуль имеет минимальный уровень защиты от некорректного ввода данных – только при отсутствии выбранного хотя бы одного

перехода выдается сообщение об ошибке. Все другие варианты определяются технологом. В второй зоне (в центре) расположена кнопка автоматического генерирования матрицы ОПВПОО для выбранных технологических переходов. В третьей зоне (справа) расположены кнопки синтеза вариантов последовательностей обработки и записи результатов в файл а также поле для отображения текстовой информации о синтезированных вариантах обработки.

Выводы. Описание ограничений последовательности выполнения технологических переходов обработки отверстий, можно реализовать в виде соответствующих матриц и графов. Информация, представленная в матрицах (графах) фактически разделяет бинарное взаимодействие различных технологических переходов на два типа: технологически произвольное и технологически детерминированное. Предложенное описание может быть использовано для формализованного синтеза вариантов последовательности обработки отверстия, представляющего собой циклическую процедуру формирования последовательно-параллельного выполнения технологических переходов. Дальнейшее усовершенствование возможно на основе выделения из технологически произвольных порядков обработки экономически предпочтительных. Показано, что эффективный учет вариативности последовательности обработки отверстий возможен на основе использования специализированного программного обеспечения, позволяющего в автоматизированном режиме синтезировать все технологически допустимые варианты обработки, с последующим выделением из них экономически целесообразных, и экспортировать их в систему управления производственными заказами цеха.

Список литературы.

1. В.А. Пасічник, Ю.В. Петраков, В.М. Кореньков. Інформаційно-енергетична трансформація виробництва від кустарного до комп'ютерно-інтегрованого / Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування – К.: 2005.– № 46. С.60-65.
2. Гавриш А.П., Ефремов А.И. Автоматизация технической подготовки Машиностроительного производства – К.: Техника, 1982 – 215с.: ил – Библиогр: с. 211–213.
3. Челищев Б.Е. и др. Автоматизация проектирования технологии в машиностроении / Б.Е. Челищев, И.В. Боброва, А. Гонсалес-Сабатер; Под ред. акад. Н.Г. Бруевича. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.: ил. – (Гибкие производственные системы).
4. Серебrenицкий П.П. Программирование для автоматизированного оборудования. Учебник для средних проф. учебных заведений / П.П. Серебrenицкий, А.Г. Схиртладзе; Под ред. Ю.М. Соломенцева – М.: Высшая школа 2003 – 592 с.: ил. ISBN 5-06-004091-х.
5. Ю.В. Петраков, В.А. Пасічник, А.В. Гіріч. Моделювання ситуаційної технології механічного оброблення у програмному середовищі "Galaxy" / Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування – К.: 2006.– № 48. С.98-103
6. В.А. Пасічник, Р.В. Галайда, Ю.В. Ковальова. Моделювання машинобудівного виробництва у середовищі „Galaxy” / Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки / Хмельницький, 2006.- №5 (85). С. 14-23
7. Каталог Seco. Обработка отверстий. Seco Tools AB, PA Group Karlstad, 2009. – 444с.
8. Каталог Seco. Фрезерование – Seco Tools AB, PA Group Karlstad, 2009. – 572 с.
9. Каталог Guhring. Прецизионный режущий инструмент. – Guhring HG, 2009, 1646 с.
10. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. 495 с., ил.