

**А.С. Бабкин доц., канд. тех. наук.**  
(Липецкий государственный технический университет, Липецк,  
Россия)

## **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПОСТРОЕНИЕ МАРШРУТА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ**

**Аннотация.** Для систем автоматизированного проектирования технологии изготовления сварных конструкций предложен новый подход к решению задачи построения технологического маршрута изготовления изделия. Решение основано на применении бинарных отношений между технологическими операциями, матричном и графовом представлении отношений. Приведены примеры применения разработанного алгоритма для конкретных производств.

**A.S. Babkin Ass. Prof., Cand. Sci.**  
(Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia)

## **AUTOMAT CREATION OF OPERATION-ROUTING SEQUENCE BASED ON GRAPH MODELS**

**Abstract.** The new approach to solving the problem of the creation operation-routing sequence for CPP is suggested. The solution is based on binary relations on collection of technology operations, matrix and graph representation of binary relations. Examples of the using worked out algorithm are given for real manufacturing.

Синтез структуры технологического процесса, т.е. определение состава операций и их последовательности, это один из наиболее важных и сложных вопросов технологических САПР. Также структуру технологического процесса называют технологическим маршрутом. Наиболее развиты САПР маршрутной технологии механической обработки резанием. Согласно классификации [1,2] методы синтеза маршрута подразделяются на три основных группы. Это, во-первых, методы, использующие фрагменты технологических процессов (ТП) из архивной базы данных САПР для построения новых единичных или типовых ТП. Исходные архивные ТП<sub>*i*</sub> (*i*=1...*n*) называются ТП-аналогами. Трудность реализации этого подхода состоит в восстановлении разорванных связей между фрагментами архивных ТП, соединяемыми в новый единый ТП. Это довольно трудная задача, поэтому САПР, применяющие такой метод не известны.

В качестве исходных ТП-аналогов могут применяться обобщенные маршруты [3]. Обобщенный маршрут обладает максимальной избыточностью, объединяя все известные структуры ТП классов изделий, поэтому такой метод предполагает, прежде всего, классификацию продукции предприятия и создание обобщенного маршрута для каждого класса.

Вторую группу, наиболее многочисленную, образуют методы, при применении которых для построения нового ТП используют элементы-аналоги [Ошибка! Источник ссылки не найден.,5]. В качестве последних могут выступать элементы ТП, т.е. - операции, переходы, оборудование, инструмент, оснастка, между которыми устанавливаются новые связи, соответствующие новому изделию и новому ТП. Задача построения ТП решается методами информационного поиска, поэтому САПР, основанные на этом методе, отягощены утомительным диалогом между пользователем и системой, служащим для выяснения состава элементов-аналогов и установления связей между ними в создаваемом новом ТП.

Методы синтеза ТП без аналогов образуют третью группу. Эти методы наиболее трудно формализуемы, их создание возможно как результат исследования и математического моделирования взаимодействия изделия и технологической системы. В настоящее время не известны САПР, использующие данный метод.

В разработанной САПР [6] для синтеза структуры ТП применен метод, основанный на понятии ИЛИ-дерева [2] и предназначенный для создания частной структуры из общей.

В общем случае проектирования технологии генерации маршрута предшествует формирование информационной модели ССЕ. Единицей информационного описания является поверхность детали. Информационная модель позволяет автоматически определять набор операций, необходимых для изготовления заданной детали. Например, анализ особенностей поверхности позволяет выявить такие операции как штамповка, гибка, сверлильная операция, фрезерная операция, нанесение покрытий. Анализ химического состава свариваемой стали, ее механических свойств и предыстории ССЕ позволяет назначать операции термообработки. Работа технолога-пользователя САПР ТП на этой стадии может быть в значительной степени облегчена в случае интеграции САПР ТП с конструкторской САПР. Таким образом, на этапе анализа информационной модели ССЕ определяется набор операций. Далее необходимо определить их последовательность, т.е. сгенерировать маршрут.

Разработан метод генерации маршрута, основанный на поиске гамильтонова пути в ориентированном графе (орграфе).

Рассмотрим конечное множество технологических операций  $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$ . Среди них найдутся такие пары, которые связаны следующими бинарными отношениями. Отношение *предшествования*  $O_i < O_j$ , т.е. операция  $O_i$  предшествует  $O_j$ , например, термическая резка  $<$  сварка, подготовка кромок  $<$  сварка. Между операциями  $O_i$  и  $O_j$ , находящимися в отношении предшествования, может быть любое количество операций. Отношение *непосредственного предшествования*  $O_i | < O_j$  (например, сварка  $| <$  зачистка). Отношение *непосредственного предшествования* соответствует отношению *следования*, т.е. за  $O_i$  следует  $O_j$ . Отношение *индифферентности*:  $O_i > < O_j$  (например, сварка  $> <$  механическая обработка).

Некоторые отношения между операциями строго заданы технологической целесообразностью (например, сварка  $<$  контроль); отношения между дру-

гими не однозначны. Так, например, операции гибки и сварки могут меняться местами в зависимости от некоторых производственных условий: при изготовлении обечаек гибка предшествует сварке, при изготовлении карт – сварка предшествует гибке. Для разрешения неоднозначности требуется привлечение знания технолога. Знания эксперта - технолога используют в алгоритме или в виде эвристические правил, или разрешение неоднозначности осуществляется в диалоговом режиме.

Для представления множества технологических операций  $O_j=1...n$  используют матрицу достижимости [7,8], построенную с использованием отношения предшествования. Матрица достижимости есть квадратная матрица  $\|S_{i,j}\|=n \times n$ , строкам и столбцам которой соответствуют операции. Значения элементов матрицы  $\|S_{i,j}\|$  определяются по правилу

$$s_{i,j} = \begin{cases} s_{i,j} = 1, & \text{если вершина } S_j \text{ достижима из } S_i \\ a_{i,j} = 0, & \text{иначе} \end{cases},$$

Матрица достижимости используется в [8] для выделения отношений следования.

Множество операций и множество отношений между ними образуют ориентированный граф, в котором вершины – это операции; отношения *непосредственного предшествования*  $O_i < O_j$  отражаются дугой (ориентированным ребром); отношения *индифферентности*:  $O_i > O_j$  представляются двумя дугами, соединяющими (инцидентными) вершины  $O_i$ ,  $O_j$  и имеющими противоположное направление. Отношение предшествования  $O_i < O_j$  на графе означает наличие пути между вершинами  $O_i$  и  $O_j$ , или *достижимость* из вершины  $O_i$  вершины  $O_j$ . Тогда задача генерации маршрута сводится к нахождению гамильтонова пути [7] в орграфе, удовлетворяющему указанным выше отношениям.

Орграф в свою очередь может быть представлен *матрицей смежности* вершин. Это квадратная матрица  $\|a_{i,j}\|$ , строкам и столбцам которой соответствуют вершины графа. Значения элементов матрицы  $a_{i,j}$  определяются по правилу

$$a_{i,j} = \begin{cases} a_{i,j} = 1, & \text{если } u_{ij} \neq 0 \\ a_{i,j} = 0, & \text{иначе} \end{cases},$$

где  $u_{ij}$  – ребро, инцидентное вершинам  $a_i$  и  $a_j$ .

Принимается также, что  $a_{i,j} = 1$ , если  $i=j$ . Существующие индифферентные отношения между операциями представляются как  $a_{i,j} = a_{j,i} = 1$ , т.е. имеется симметрия относительно главной диагонали матрицы.

Из определения гамильтонова пути [7] следует, что в маршруте может быть только одна операция одного типа, например, контроль, поэтому, если контрольных операций несколько, то или они вставляются в полученную последовательность операций (технологический маршрут) автоматически после нужных технологических операций, или в список вводится нужное число спе-

цифических операций контроля. Например, контроль сварки, контроль механической обработки и т.п.

Возможно применение известных алгоритмов для нахождения гамильтонова пути [7]. Разработан алгоритм нахождения гамильтонова пути, реализующий метод Фаулкса [9]. Метод Фаулкса использует понятия матрицы  $A^{[k]}$  путей длины  $k$ , стока и истока. Исток – один из полюсов графа, которому инцидентны только исходящие дуги. Сток - один из полюсов графа, которому инцидентны только заходящие дуги. Матрица  $A^{[k]}$  показывает существование между парами вершин путей длины меньшей или равной  $k$ .  $A^{[k]}$  - это квадратная матрица  $\|a_{i,j}\|$ , строкам и столбцам которой соответствуют вершины графа. Значения элементов матрицы  $A^{[k]}$  путей длины  $k$  определяются умножением матрицы  $A^{[k-1]}$  саму на себя. При этом алгебраическая сумма заменяется на булеву и существование между парами вершин путей длины меньшей или равной  $k$  задается  $a_{i,j} = 1$ .

Алгоритм имеет следующие шаги.

Построение матрицы смежности вершин  $A$  по известным отношениям следования.

Удаление стока

Удаление истока

Цикл пока  $A^{[k]} \neq A^{[k+1]}$

    Вычисление матрицы путей длины  $k+1$   $A^{[k+1]}$

    Удаление стока

    Удаление истока

Конец цикла пока

Возвращение удаленных стоков и истоков в матрицу  $A$

Перегруппировка матрицы  $A$

Определение классов эквивалентности относительно закона: вершина  $j$  достижима из  $i$  и обратно.

Конец алгоритма

Перегруппировка матрицы  $A$  заключается в сортировке по столбцам: номер столбца тем меньше, чем более он содержит нулей.

Пример 1. Рассмотрим типичный набор операций сборки и сварки тракторного машиностроения, применяемый в ОАО «Липецкий трактор»: транспортная (0401), комплектование (0418), сборка (8800), сварка контактная точечная (9011), сварка дуговая в углекислом газе (9051), зачистка (0109), контроль (02).

Установим отношения следования в множестве операций  $\{0401, 0418, 8800, 9011, 9051, 0109, 02\}$ . Транспортная операция (0401) прешествует всем операциям этого множества. Операция сборки предшествует всем видам сварки:  $8800 |< 9011, 9051$ . Зачистка всегда следует непосредственно за сваркой в углекислом газе  $9051 |< 0109$ . Транспортная операция предшествует комплектованию  $0401 |< 0418$ . Отношением «индифферентность» отражается тот факт, что порядок следования операций «сварка в углекислом газе» и «сварка точечная» в

маршруте может быть разным -  $9011 \gg 9051$ . Зачистка следует за дуговой сваркой. Комплектование непосредственно предшествует сборке.

Матрица *достижимости* (предшествования)  $S$  для описанного множества операций  $\{0401, 0418, 8800, 9011, 9051, 0109, 02\}$  имеет вид

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

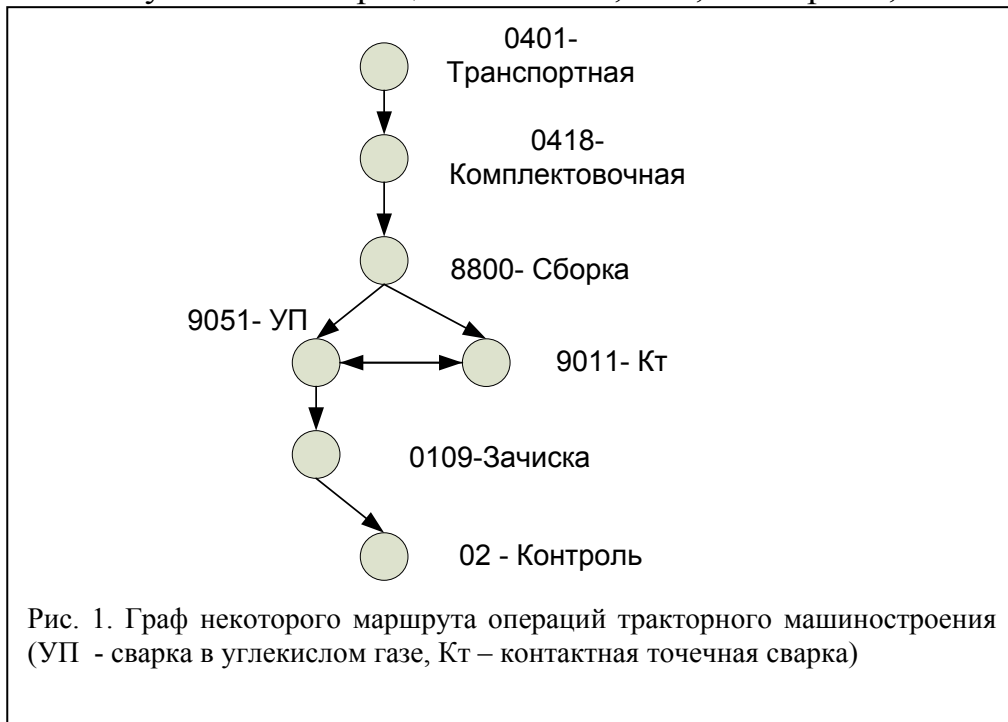
Видно, что транспортная операция является истоком, а операция контроля – стоком, поэтому они могут быть исключены из анализируемой далее матрицы следования. Для большей наглядности работы алгоритма расположим операции в следующем произвольном порядке  $\{9011, 9051, 0109, 8800, 0418\}$ . Тогда матрица следования будет иметь вид

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрицы путей не более 2, 3 и 4, соответственно, имеют вид

$$A^{[2]} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, A^{[3]} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, A^{[4]} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Анализ полученных матриц показывает, что, во-первых,  $A^{[3]}=A^{[4]}$ , по-



этому дальнейшие преобразования прекращаются. Видно, что во-вторых, сначала операция комплектования, затем операция сборки становятся истоками (соответствующие строки содержат только 1, столбцы - 0). После их удаления операция зачистки проявляется как сток (нули в третьей строке и единицы в третьем столбце), т.е. операция зачистки может быть только последней в маршруте. Оставшиеся операции сварки (9051, 9011) являются эквивалентными, т.к. отношение следования между ними не определено. Отсюда следуют такие последовательности операций {0418, 8800, 9011, 9051, 0109} и {0418, 8800, 9051, 9011, 0109}.

В соответствии с установленными отношениями образован оргграф (рис. 1), из которого видно, что полученные последовательности операций действительно имеют место. Матрица смежности вершин графа совпадает с матрицей следования операций.

Пример 2. В цехе металлоконструкций ОАО «НЛМК» используются технологические операции, перечисленные в таблице.

Группа	Операция	Код	Примечание
Перемещение	Транспортирование	0401	
	Перекладка (на стеллаж)	0409	
Операции общего назначения	Очистка	0130	
	Разметка	0101	
	Зачистка	0109	
	Нагревание	0103	
	Маркирование	0180	
	Подготовка оснастки	0168	

Обработка давлением	Штамповка	2173	
	Гибка	2129	
	Вальцовка	2190*	Введена дополнительно к [10]
	Правка	2156	
	Рубка (на гильотинных ножницах)	2107	
Механическая обработка	Сверлильная	4210	
	Снятие фасок	4199*	Введена дополнительно к [10]
	Сборка	8864	
	Термическая резка ручная	9170	
	Термическая резка машинная	91701*	Введена дополнительно к [10]
	Сварка дуговая	9030	
	Контроль	02	

Примечание. Кодирование операций выполнено по [10].

Анализ производства и технологических процессов позволил установить следующие отношения в этом множестве операций. Транспортирование деталей на рабочее место предшествует всем операциям. После термической резки непосредственно следует зачистка шлама 9170|<0109. Как обычно, сварка непосредственно предшествует зачистке 9030|<0109, также рубка предшествует зачистке 2107|<0109. Необходимо разметить заготовку непосредственно перед ручной термической резкой, рубкой и сверлением, т.е. 0101|<9170, 0101|<2107, 0101|<4210. Нагревание производят непосредственно перед гибкой 0103|<2129. Все операции, кроме маркирования, предшествуют контролю. Рубка (2107), также как термическая резка (9170), предшествуют сверлильной 2107|<4210, сборке 2107|<8864 и сварке 2107|<9030. Маркирование непосредственно следует после таких операций как контроль, зачистка, штамповка. После операций маркирование (0401), гибка (2129) непосредственно следует транспортирование (0401), т.е. 0180|<0401, 2129|<0401. Подготовка оснастки (0168) непосредственно предшествует сборке (8864), т.е. 0168|<8864. Обычно, если нет особых указаний на последовательность сварки и сверлильной, для этих операций принимается отношение индифферентности 9030|>4210. При изготовлении ССЕ, имеющих форму тел вращения (обечайки, конусы), приняли, что операция вальцовки непосредственно предшествует операции сварки 2190|<9030.

Применение предложенного метода построения маршрута рассмотрим на примере изготовления фермы. При изготовлении фермы применяют следующие операции: транспортирование (0401), очистку (0130), разметку (0101), зачистку (0109), рубку (2107) на гильотинных ножницах, сварку дуговую (9030), контроль (02), сборку (8864). Матрица отношения следования множества операций этого множества

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

После вычисления матрицы путей не более 5 имеем

$$A^{[5]} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

Из последней матрицы видно, что операции транспортирования, очистки и разметки последовательно являются истоками, операция контроля – сток. После их удаления из  $A^{[5]}$  получаем, что операция зачистки – сток, операция рубки - исток. И, наконец, сборка – это исток относительно сварки. Окончательно после сортировки столбцов имеем следующий маршрут: транспортирование (0401), очистка (0130), разметка (0101), зачистка (0109), рубка (2107), сборка (8864), сварка (9030), контроль (02).

Таким образом, разработанный алгоритм формирования маршрута изготовления ССЕ представляется следующим образом. Анализируют бинарные отношения между набором технологических операций. Строят матрицу смежности вершин графа по определенным ранее отношениям следования и индифферентности. Далее, применяя алгоритм Фаулкса, определяют маршрут.

#### Литература

1. Технологическая подготовка гибких производственных систем/С.П. Митрофанов, Д.Д. Куликов, О.Н. Миляев, Б.С. Падун; Под общ. ред. С.П. Митрофанова. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987.- 352с
2. Интеллектуальные САПР технологических процессов в радиоэлектронике. /А.С.Алиев, Л.С. Восков, В.Н. Ильин и др.; Под ред. В.Н. Ильина. - М.: Радио и связь. 1991.- 264 с.



- 3.Кривошея В.Е. Разработка математического обеспечения САПР маршрутных технологических процессов изготовления сварных конструкций.//Сварочное производство.-1986.-№5.-С.36-38.
- 4.Ерофеев В.А. Оптимизация САПР технологии сборочно-сварочного производства.// Сварочное производство.-1995.-№4.-С.19-21.
- 5.Бабкин А.С. Разработка САПР комплекса технологических документов сборки-сварки с применением СУБД реляционного типа.//Сварочное производство.-1996.-№1.-С.36-38.
- 6.Бабкин А.С. САПР маршрутной технологии изготовления изделий из конструкционной стали//Автоматизация и современные технологии.-2005.- №1. – С.16-21.
- 7.Алгоритмы и программы решения задач на графах и сетях/ М.И. Нечепуренко [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1990. – 515 с.
- 8.Применение ЭВМ в технологической подготовке серийного производства. / С. П. Митрофанов, Гульнов О.А. [и др.]; под ред. С. П. Митрофанова. – М.: Машиностроение, 1981. –287 с.
- 9.Кауфман А., Фор А. Займемся исследованием операций. М.: Мир, 1966. –279 с.
- 10.Классификатор технологических операций машиностроения и приборостроения. - М.: Издательство стандартов, 1987. - 71 с.