

УДК 658.011.56

А. И. Коршунов, доктор технических наук, профессор;
А. П. Кузнецов, кандидат технических наук, доцент;
В. А. Тененёв, доктор физико-математических наук, профессор;
А. В. Тененёва, студентка;
Б. А. Якимович, доктор технических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПРИ СИНТЕЗЕ СТРУКТУР-СТРАТЕГИЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Рассматривается математический аппарат, обеспечивающий решение задачи выбора технологического оборудования, необходимого для реализации структуры стратегии производственной системы, ориентированной на определенную номенклатурную модель.

Ключевые слова: структура-стратегия, технологический процесс, технологическое оборудование, производственная система, номенклатурная модель, генетический алгоритм

Под структурой-стратегией производственной системы понимается набор элементов и вариантов технологий. Элементы и технологии взаимно адаптированы с изделиями определенной конструктивно-технологической сложности. На этапе синтеза структур-стратегий требуется оптимизировать технологические процессы с целью максимальной эффективности использования оборудования при минимальных материальных затратах. Будем рассматривать задачу выбора оборудования и составления оптимального производственного расписания при заданных технологических маршрутах нескольких изделий машиностроения. Составление расписаний является комбинаторной задачей, представляющей определенную сложность в случае большой размерности. Для решения поставленной задачи применим генетические алгоритмы.

Тестовая задача о коммивояжере

Особенности решения комбинаторных задач генетическими алгоритмами рассмотрим на известной задаче о коммивояжере [1]. Требуется определить маршрут однократного посещения n пунктов с возвращением в исходную точку маршрута. Перемещение из пункта i в j связано с некоторыми затратами, задаваемыми матрицей a_{ij} , $i, j = \overline{1, n}$. В общем случае матрица несимметричная. Маршрут должен обеспечивать минимальные суммарные затраты. Целевая функция данной задачи может быть записана в виде

$$F = \sum_{k=1}^{n-1} a_{S(k)S(k+1)} + a_{S(n)S(1)} \rightarrow \min,$$

где $S(k)$, $k = \overline{1, n}$ – перестановка, состоящая из последовательности номеров проходимых пунктов назначения.

В данной задаче в качестве хромосомы выступает эта перестановка $S(k) = \langle S_1, \dots, S_n \rangle$. Дополнительного кодирования здесь более не требуется. Для скрещивания применяется оператор, подобный двухточечному в бинарном кодиро-

вании. Случайным образом выбираются две позиции k_1, k_2 . Скрещиваемые особи обмениваются фрагментами $S(k), k \in [k_1, k_2]$. Остальные числа, не входящие в фрагмент, берутся у родительской особи, начиная с какой-либо позиции, например с k_1 . Например, результатом скрещивания перестановок S_1, S_2 является хромосома S_3 . Фрагмент обмена содержит позиции с 4 по 7.

S_1	1	4	7	8	10	5	9	3	2	6
S_2	5	7	3	9	1	10	6	8	4	2
S_3	8	5	3	9	1	10	6	2	4	7

Для проверки алгоритма взят пример из книги [1] для шести пунктов. Матрица затрат имеет следующий вид:

	1	2	3	4	5	6
1	0	4	10	13	4	8
2	2	0	9	7	6	7
3	8	5	0	5	5	9
4	5	8	5	0	7	10
5	6	4	4	9	0	4
6	5	1	4	8	3	0

Типичная картина установления оптимального решения показана на рис. 1.

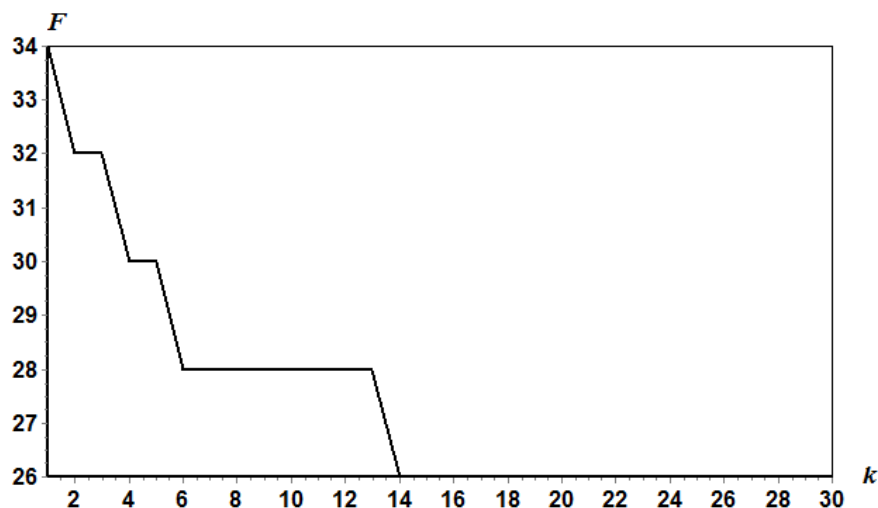


Рис. 1. Изменение целевой функции в процессе итераций

Значение $F = 26$ соответствует полученному в работе [1] методом ветвей и границ. Оптимальная перестановка $\langle 1, 5, 3, 4, 6, 2 \rangle$ показана на рис. 2.

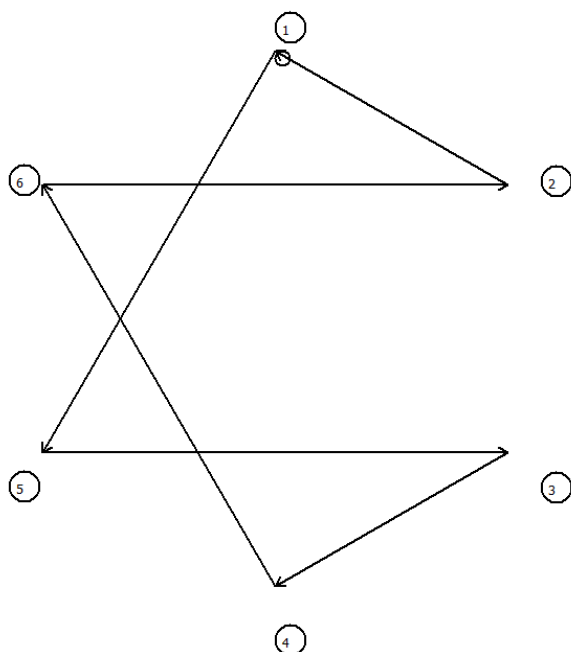


Рис. 2. Схема оптимального маршрута

Генетический алгоритм достаточно легко справляется и с задачами более высокой размерности. Для $n = 50$ итерационный процесс приведен на рис. 3.

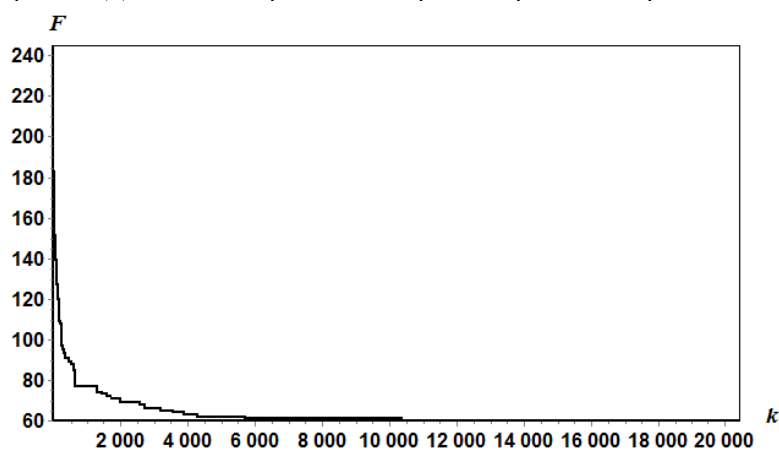


Рис. 3. Изменение целевой функции в процессе итераций ($n = 50$)

Для заданной несимметричной матрицы затрат получено значение целевой функции $F = 60$.

Маршрут приведен на рис. 4. Полученная перестановка является устойчивой по нескольким запускам.

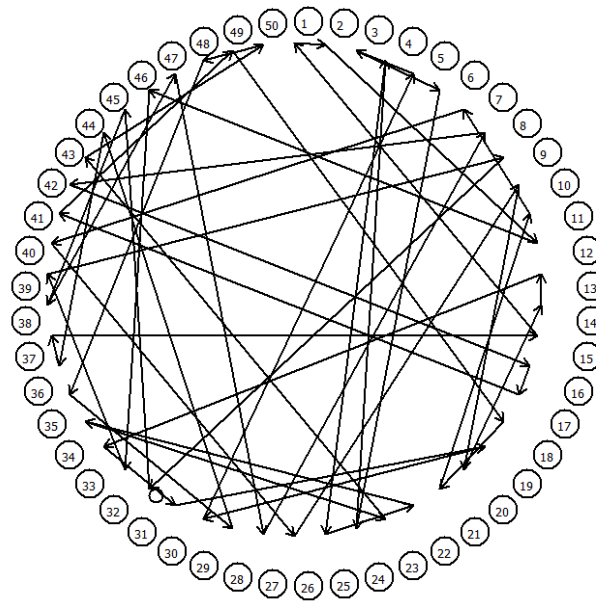


Рис. 4. Схема оптимального маршрута

Составление производственного расписания

На следующем этапе будем решать задачу составления производственного расписания. Сформулируем задачу следующим образом.

Имеется набор деталей $d_i, i = \overline{1, m}$, который проходит обработку на нескольких типах оборудования $e_j, j = \overline{1, n}$. Задана продолжительность времени обработки i -й детали на j -м оборудовании $\tau_{ij}, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$. Для каждой детали определена последовательность прохождения обработки на имеющихся видах оборудования, т. е. задан технологический маршрут, как перестановка $\theta_i = \langle \theta_i^1, \dots, \theta_i^n \rangle$. Требуется составить график обработки деталей, оптимальный по какому-либо критерию. Например, в качестве критерия возьмем время обработки последней детали.

Обозначим время завершения обработки i -й детали на j -м оборудовании $t_{ij}, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$. Тогда задача заключается в нахождении последовательностей обработки деталей на каждом оборудовании (перестановок $\langle S \rangle^j = S_i^j$), обеспечивающих минимум времени полной обработки

$$\max_i t_{i\theta_n} \rightarrow \min$$

с соблюдением всех технологических маршрутов.

Эта задача довольно просто реализуется в случае одинаковых технологических маршрутов. В этом случае все возможные перестановки S_i^j являются допустимыми. В качестве операторов скрещивания можно применять операторы из предыдущей постановки задачи о коммивояжере. При разных технологических маршрутах появляется множество недопустимых перестановок, не позволяющих пройти пол-

ный цикл обработки. Возникает проблема генерации допустимых особей в генетическом алгоритме, наследующих родительские свойства.

Для представления производственного процесса будем применять сети Петри. Обобщенная сеть Петри представляет собой двудольный мультиграф [2]. Каждая позиция соединяется с другими позициями через переход. Состояние сети Петри изменяется при срабатывании активных переходов. Начальному состоянию сети соответствует исходная маркировка. При некоторой исходной маркировке реализуется конечное состояние, характеризующееся конечной маркировкой. При наличии тупиковых переходов состояние сети может оказаться тупиковым. Недопустимые перестановки соответствуют тупиковым состояниям сети Петри. Достижимая маркировка сети определяет непротиворечивый полный цикл обработки деталей.

В качестве позиций сети Петри примем состояния производственного процесса P_{ij} :

i -я деталь обрабатывается на j -м оборудовании. Назовем связь между состояниями вертикальной, если она осуществляется между деталями при фиксированном оборудовании. Горизонтальная связь соответствует переходу детали с фиксированным номером к другому виду оборудования. Обычно сеть Петри изображают в виде кружков, соответствующих позициям. Переходы обозначаются вертикальными жирными черточками. Маркировка соответствует некоторому количеству маркеров в каждой позиции. При построении сети Петри, соответствующей производственному процессу (S_i^j, θ_i) , $i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n}$ будем придерживаться следующих правил:

1. Входными позициями (i_B, j_B) являются состояния, для которых выполняется условие $L_S(S_i^n) = 1$, $\eta = \theta_i^1$, где $L_S(S_i^j)$ – порядковый номер (локус) в перестановке. Если входных позиций нет, то соответствующая сеть является недопустимой.

2. Входные позиции не имеют входных дуг. В позицию, имеющую две выходных дуги, приходят из перехода также две дуги. Если выходная дуга у позиции одна, то количество входных дуг зависит от типа выходной связи. Если связь вертикальная, то дуги две. Для горизонтальной связи дуга одна. Если выходных дуг нет (концевые состояния), то входная дуга одна.

3. Начальная маркировка задается следующим образом. Во входных позициях по два маркера, в остальных позициях маркеров нет.

4. Конечная маркировка сети Петри должна иметь по одному маркеру в позициях (i_E, j_E) , $i_E = \overline{1, m}$; $j_E = \theta_i^n$.

5. Если конечная маркировка достижима, то производственный процесс является допустимым.

Для построенной таким образом сети Петри применимы правила, определяющие динамику сети [2].

1. Условие активности перехода. Переход является активным, если количество маркеров во входной позиции не менее количества дуг между ними.

2. Изменение маркировки при срабатывании перехода. Из входной позиции исчезает столько маркеров, сколько дуг между нею и переходом. В выходной позиции появляется столько новых маркеров, сколько дуг соединяют позицию и переход.

В генетическом алгоритме решения задачи о производственном расписании в качестве хромосомы (особи) выступает сеть Петри. Процесс генерации потомков при скрещивании двух хромосом $(S_i^j, \theta_i)_1$, $(S_i^j, \theta_i)_2$ следующий. Перестановки $(S_i^j)_1$,

$(S_i^j)_2$ скрещиваются с применением операторов, подобных оператору в задаче о коммивояжере. Если полученная особь является допустимой, она поступает в новую популяцию. Если особь недопустимая, проводится ее доработка по k -этапной схеме:

- 1) $k = 1, i = 1$;
- 2) $j = \theta_i^1, S_i^j = i$;
- 3) $k = k + 1, i = i + 1 \rightarrow 2)$.

Рассмотрим пример с $m = 7, n = 5$. В табл. 1 заданы продолжительности работ $\tau_{ij}, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$.

Таблица 1. Продолжительность работ

	1	2	3	4	5
1	6,8896	3,0221	6,657	9,7236	9,4645
2	5,715	4,8303	9,006	3,3034	7,9777
3	2,7587	9,1295	4,4346	6,4039	7,4487
4	9,4516	1,7755	5,4425	8,9199	4,2859
5	1,7716	4,3651	9,3749	5,1501	1,5972
6	10,2944	4,9321	5,0768	3,9197	5,2971
7	6,9203	10,9861	7,225	4,5373	4,7364

Сначала найдем решение для одинаковых технологических маршрутов для всех деталей. Рассчитанные времена выполнения работ представлены в табл. 2.

Таблица 2. Время выполнения работ

	1	2	3	4	5	T_i
1	27,4293	30,4514	38,1123	47,8359	57,3004	57,3004
2	7,4866	12,3169	21,3229	24,6263	32,6040	32,604
3	10,2453	21,4464	25,8810	32,2849	69,4855	69,4855
4	43,8012	47,1112	58,0032	66,9231	73,7714	73,7714
5	1,7716	6,1367	67,3781	72,5282	75,3686	75,3686
6	20,5397	26,3785	31,4553	36,2046	41,5017	41,5017
7	34,3496	45,3357	52,5607	57,0980	62,0368	62,0368

Полное время завершения работ равно 75,37. Это достигается при очередности работ, приведенной в табл. 3.

Таблица 3. Оптимальная очередность обработки деталей

1	2	3	4	5
5	5	2	2	2
2	2	3	3	6
3	3	6	6	1
6	6	1	1	7
1	1	7	7	3
7	7	4	4	4
4	4	5	5	5

Сходимость итерационного процесса показана на рис. 5.

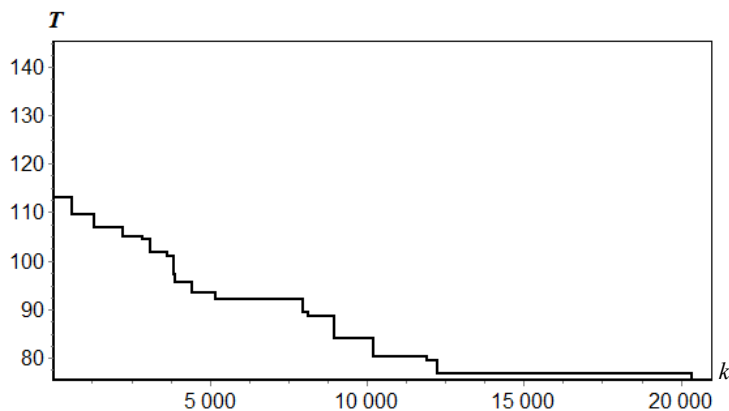


Рис. 5. Сходимость итерационного процесса при одинаковых технологических маршрутах

Графическое представление производственного процесса (Гантт-карта) приведено на рис. 6.

На рисунке приведены номера деталей от 1 до 7 и номера линий, соответствующие оборудованию пяти видов. Стрелки соответствуют началу и окончанию обработки i -й детали на j -м оборудовании.

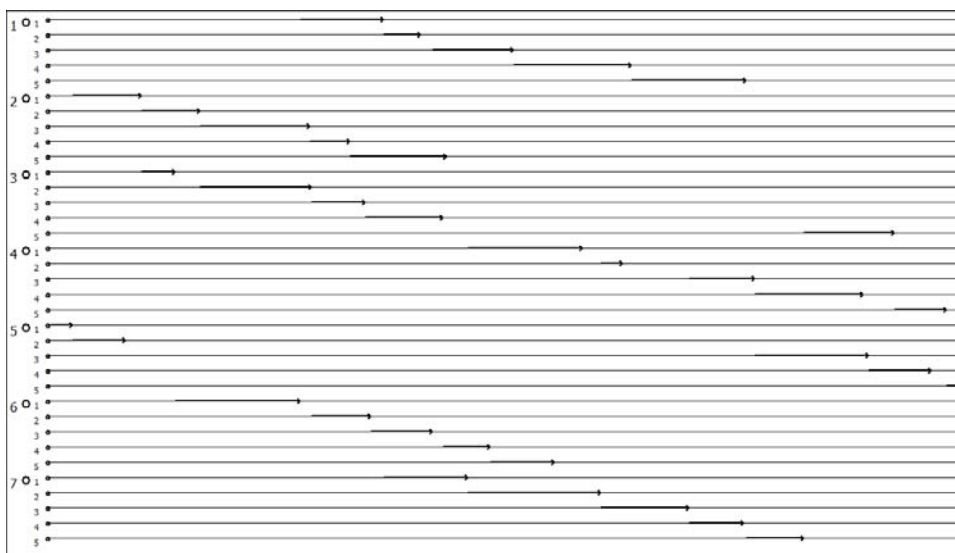


Рис. 6. Гантт-карта для одинаковых технологических маршрутов

Перейдем к задаче составления расписания для разных технологических маршрутов, представленных в табл. 4.

Таблица 4. Технологические маршруты для деталей

	1	2	3	4	5
1	1	4	2	3	5
2	1	4	2	5	3
3	5	1	2	3	4
4	1	2	3	5	4
5	1	4	2	3	5
6	1	3	2	4	5
7	1	4	2	3	5

Продолжительность обработки соответствует табл. 1. Сходимость итерационного процесса существенно не изменилась (рис. 7).

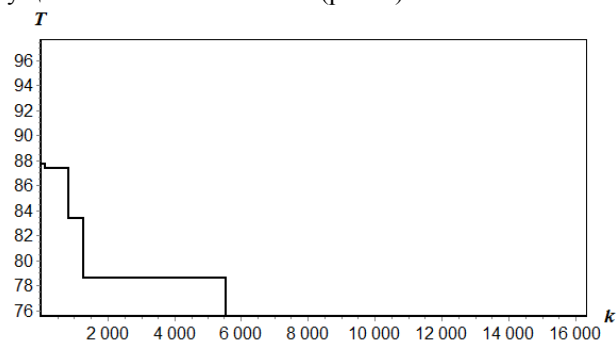


Рис. 7. Изменение полного времени обработки в процессе итераций

Полное время обработки также мало изменилось и равняется 75, 56 (табл. 5).

Таблица 5. Время выполнения работ

	1	2	3	4	5	T_i
1	6,89	19,636	35,932	16,614	50,391	50,391
2	12,605	28,663	75,556	19,917	36,641	75,556
3	26,588	37,793	46,394	67,583	7,449	67,583
4	22,057	23,833	29,275	57,259	40,927	57,259
5	23,829	42,158	55,769	28,979	57,366	57,366
6	36,882	47,09	41,959	61,179	66,476	66,476
7	43,802	59,325	66,55	48,339	71,286	71,286

Очередность проведения работ изменилась существенно, что следует из табл. 6 и рис. 8.

Таблица 6. Оптимальная очередность обработки деталей

1	2	3	4	5
1	1	4	1	3
2	4	1	2	2
4	2	6	5	4
5	3	3	7	1
3	5	5	4	5
6	6	7	6	6
7	7	2	3	7

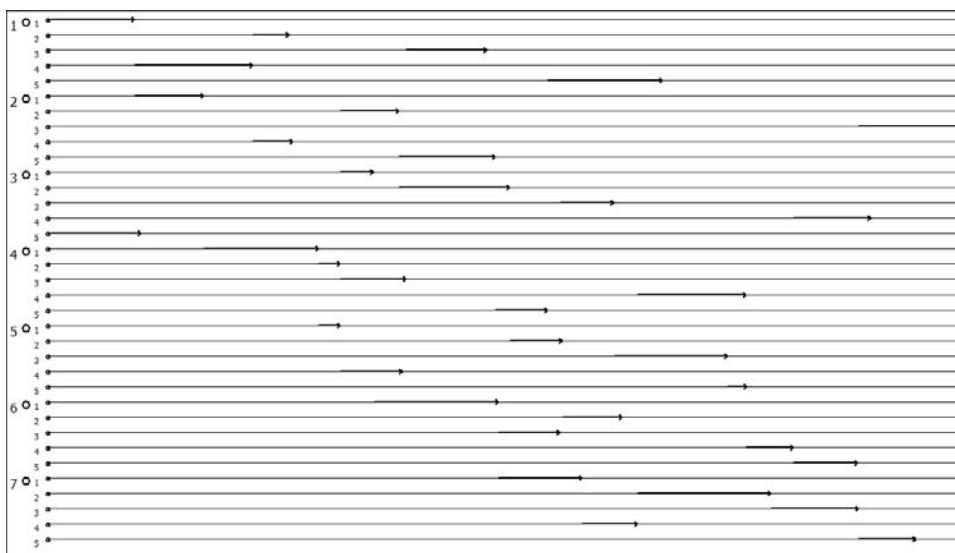


Рис. 8. Гантт-карта для разных технологических маршрутов

На рис. 9 приведена сеть Петри, соответствующая оптимальному решению.

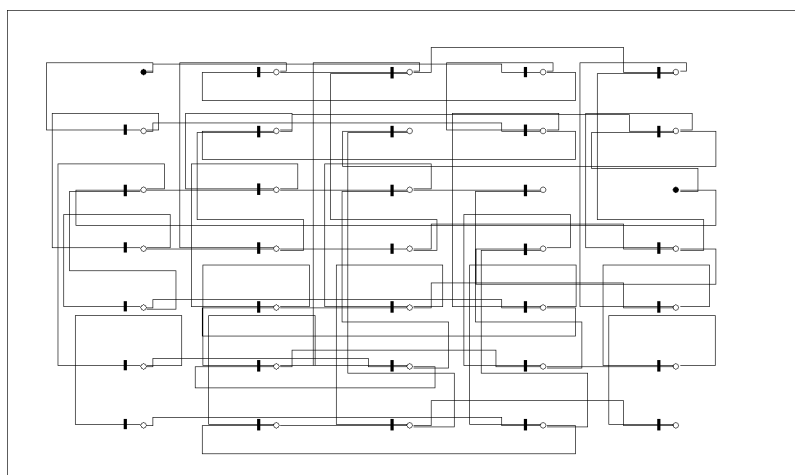


Рис. 9. Сеть Петри, соответствующая оптимальному решению

Входных позиций в сети две (1,1) и (3,5). Последовательное срабатывание переходов приводит к достижению позиций (1,5), (2,3), (3,4), (4,4), (5,5), (6,5), (7,5) с одним маркером. Из них позиции (2,3), (3,4), (7,5) являются концевыми позициями (без выходных дуг).

Как видим, для представленного алгоритма нет принципиальной разности между решениями вариантов с одинаковыми или различными технологическими маршрутами. Задачу о составлении производственных расписаний далее расширяем за счет использования нескольких единиц однотипного оборудования.

Оптимизация количества единиц оборудования

Парк оборудования может содержать несколько единиц одинакового оборудования. В этом случае необходимо поставить задачу загрузки оборудования с определением оптимального количества единиц оборудования каждого типа. Большее количество единиц оборудования уменьшает время полного цикла обработки деталей, но увеличивает затраты и снижает эффективность использования оборудования.

Введем обозначения: $N_j, j = \overline{1, n}$ – количество единиц оборудования j -го типа;

$C_j, j = \overline{1, n}$ – стоимость одной единицы оборудования; $\sum_{j=1}^n C_j N_j$ – суммарные затраты.

Целевая функция, характеризующая производственное расписание с выбором количества единиц оборудования, принимает вид

$$f(\langle S \rangle^j, N_j) = \alpha \max_i t_{i0_n} + \sum_{j=1}^n C_j N_j \rightarrow \min.$$

Здесь α – коэффициент, устанавливающий стоимостной эквивалент единицы времени производственного процесса.

Эту задачу также можно сформулировать как двухкритериальную:

$$f_1(\langle S \rangle^j, N_j) = \max_i t_{i0_n} \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$f_2(\langle S \rangle^j, N_j) = \sum_{j=1}^n C_j N_j \rightarrow \min. \quad (2)$$

В этом случае не требуется знание коэффициента α . Алгоритм многокритериальной оптимизации приведен в работе [3].

Состояние характеризуется хромосомой $(\langle S \rangle^j, N_j)$, где перестановка $\langle S \rangle^j$ разбита на N_j перестановок так, что

$$\langle S \rangle^j = \bigcup_{k=1}^{N_j} \langle S \rangle^k, \quad \bigcap_{k=1}^{N_j} \langle S \rangle^k = 0. \quad (3)$$

Части хромосомы $\langle S \rangle^j$ скрещиваются как перестановки, а переменные N_j с применением обычных операторов скрещивания [4].

В качестве примера для расчета рассмотрим набор деталей, нумерация которых представлена в табл. 7.

Виды работ, тип и количество оборудования содержатся в табл. 8.

Таблица 7. Набор обрабатываемых деталей

1	Плунжер верхний
2	Цилиндр
3	Плунжер нижний
4	Втулка
5	Вал ЦНС
6	Вал пром. РН-2300
7	Вал ведущий РН-2300
8	Вал ведущий Ц2НШ-750
9	Вал пром. Ц2НШ-750

Таблица 8. Применяемое оборудование

j	1	2	3	4	5
Работы	отрезные	термические	токарные	сверлильные	слесарные
Тип	8Г663Ф2		СА-562С100	2С132	
N_j	1	1	4	1	1
j	6	7	8	9	10
Работы	токарные	фрезерные	шлифовальные	зуборезные	токарные
Тип	1М63Н	ВМ-127М	3М175	5К32А	СА 1150
N_j	1	4	1	1	1

Технологические маршруты деталей и продолжительность обработки приведены в табл. 9, 10.

Таблица 9. Технологические маршруты деталей

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

Таблица 10. Продолжительность обработки

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,03	0,1	2,26							
2	0,025	0,1	2,26							
3	0,02	0,1	2,26	0,01						
4	0,025		0,4		0,49					
5	0,102	0,33				25,76	3,43	10,81		
6	0,086	0,4					0,3		2,05	3,86
7	0,062	0,4					0,5		5,45	5,5
8	0,062	0,4					0,5		3,25	2,57
9	0,097	0,4					0,4		2,68	1,39

В результате решения поставленной оптимизационной задачи (1)–(3) получены следующие очередности прохождения деталей на имеющемся оборудовании $S_i^j, i = \overline{1, 9}; j = \overline{1, 10}$:

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

Временной график обработки и соответствующая Гантт-карта представлены в табл. 11 и на рис. 10.

Таблица 11. Временной график обработки

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,03	0,662	18,951	0	0	0	0	0	0	0
2	0,157	0,562	16,691	0	0	0	0	0	0	0
3	0,177	0,762	21,211	0,187	0	0	0	0	0	0
4	13,541	0	14,431	0	14,031	0	0	0	0	0
5	0,132	0,462	0	0	0	26,222	29,652	40,462	0	0
6	13,516	14,403	0	0	0	0	30,852	0	13,43	27,323
7	13,762	15,203	0	0	0	0	31,352	0	5,45	23,463
8	13,603	14,003	0	0	0	0	30,552	0	8,7	16,573
9	13,7	14,803	0	0	0	0	30,052	0	11,38	17,963

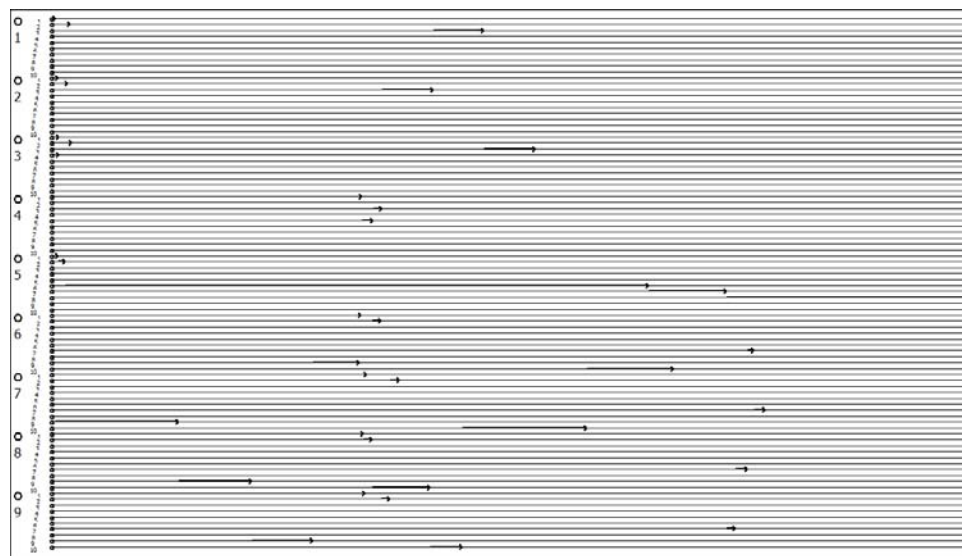


Рис. 10. Гантт-карта технологического процесса

Наиболее затратной по времени является пятая деталь – вал ЦНС. Срабатывание сети Петри (рис. 11) происходит следующим образом.

Входными являются позиции (1,1) и (7,9). Сначала обрабатывается первая деталь на отрезном оборудовании и срабатывает переход (5,1). Активизация перехода (5,1) открывает последующую цепочку обработки пятой детали: (5,2) – (5,6) – (5,7) – (5,8) в соответствии с технологическим маршрутом.

Оптимальным по критерию (2) является количество оборудования $N_j = 1, j = \overline{1,10}$. Таким образом, для данного набора достаточно по одной единице оборудования в цехе.

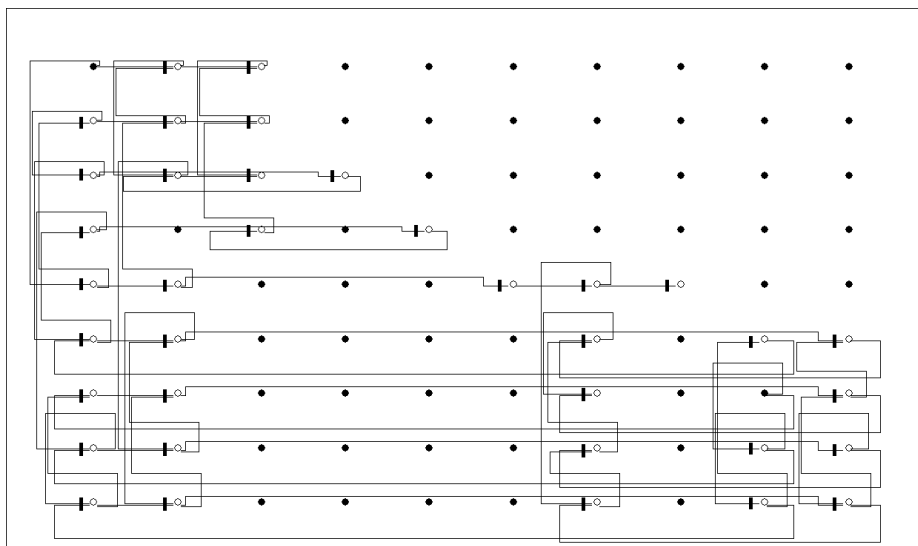


Рис. 11. Сеть Петри для оптимального технологического процесса

По результатам проведенной работы можно сделать вывод, что предложенный способ кодирования производственного процесса сетями Петри в генетическом алгоритме позволяет проводить оптимизацию структур-стратегий на этапе их синтеза.

Список литературы

1. Зайченко Ю. П. Исследование операций : учеб. – 3-е изд., перераб. и доп. – Киев : Выща шк., 1988. – 552 с.
2. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
3. Тененев В. А. Решение задачи многокритериальной оптимизации генетическими алгоритмами // Интеллектуал. системы в пр-ве. – 2006. – № 2. – С. 54–59.
4. Тененев В. А. Применение генетических алгоритмов с вещественным кроссовером для минимизации функций большой размерности // Интеллектуал. системы в пр-ве. – 2006. – № 1. – С. 93–107.

* * *

A. I. Korshunov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University

A. P. Kuznetsov, кандидат технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет

V. A. Tenenev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University

A. V. Teneneva, Student, Izhevsk State Technical University

B. A. Yakimovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University

Optimization of Technological Component at Structure and Strategy Synthesis of Machine-Building Production Systems

The problem of equipment selection and optimal production scheduling is stated when the process flow involves several engineering items. The genetic algorithm is applied to solve the problem. A coded

representation of the production process by Petri nets providing a permissibility of the solution is offered. The example of optimization of existing technological process is given.

Keywords: structure and strategy, technological process, technological equipment, production system, product range model, genetic algorithm

Получено 08.11.10

УДК 53.01.07

Е. А. Морозов, доктор технических наук, профессор;
И. Н. Ефимов, доктор технических наук, профессор;
Чайковский технологический институт (филиал)
Ижевского государственного технического университета
В. А. Алексеев, доктор технических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет

О ВОЗМОЖНОСТИ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ТЕРМОЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ В МИКРООБЪЕМЕ

Обоснована возможность осуществления микротермоядерного синтеза при условии обеспечения высокоточной фокусировки ионных потоков большой энергии.

Ключевые слова: микротермоядерный синтез, высокоточная фокусировка, ионные потоки, большая мощность

Получение управляемого термоядерного синтеза, процесса слияния легких атомных ядер, с регулируемым выделением энергии при высоких температурах – одна из важнейших научно-технических проблем современности. Огромное значение, которое придается исследованиям в области управляемого термоядерного синтеза, объясняется рядом причин. Нарастающее загрязнение окружающей среды настоятельно требует перевода промышленного производства планеты на замкнутый цикл, при котором возникает минимум отходов. Но подобная реконструкция промышленности неизбежно связана с резким ростом энергопотребления. Предполагается, что к 2050 г. производство энергии в мире возрастет примерно в три раза по сравнению с нынешним уровнем и достигнет 10^{21} Дж в год. Между тем ресурсы минерального топлива ограничены и при сохранении существующих темпов развития энергетики будут исчерпаны на протяжении ближайших десятилетий (нефть, горючие газы) или столетий (каменный уголь). Переход от органических топлив к широкомасштабной альтернативной энергетике намечается к середине XXI века. Ожидается, что возобновляемые источники энергии, такие, как солнечная энергия, энергия ветра, гидроэлектроэнергия, сжигание биомассы, будут использоваться в переменной составляющей потребления энергии, сглаживающей суточные и сезонные колебания.

Основной и единственный кандидат для базовой энергетике – это ядерная энергия. Переход энергетике в глобальном масштабе на ядерные реакторы деления ставит сложные проблемы захоронения огромных количеств долгоживущих радиоактивных отходов. Основное и принципиальное отличие термоядерной энергетике заключается в отсутствии долгоживущих изотопов (так называемый «чистый» реактор).

Таким образом, для снижения радиоактивности до безопасного состояния у выработавшего ресурс термоядерного реактора требуется около тридцати лет. По