

ВОПРОСЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ СЕТИ ПЕТРИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА

© 2023 А. Н. Сочнев✉

*Сибирский федеральный университет
пр. Свободный, 79, 660041 Красноярск, Красноярский край, Российская Федерация*

Аннотация. В представленной статье представлено описание системного подхода к решению задачи оперативно-календарного планирования производства на основе имитационного моделирования временными сетями Петри. В основе предложенного подхода — идеи автоматизированного синтеза сетевых моделей дискретных производственных систем и применения оптимизационно-имитационного подхода для поиска наилучшего плана производства. На основе разработанных теоретических положений представлен тестовый пример, характеризующий эффект от их применения. В качестве объекта исследования выбран типичная производственная система механической обработки. Формирование общей имитационной модели производственного процесса осуществляется из моделей основных типов технологических процессов, что значительно упрощает и ускоряет этот процесс. В практике применения сетей Петри сложность разработки моделей, их интерпретации, внесения изменений — это факторы, значительно ограничивающие их использование. В процессе решения задачи предварительного планирования производства определен и предложен для применения новый способ влияния на критерий оптимальности через задание различных отношений инцидентов в сети Петри. Оптимизационная процедура сводится к поиску наилучшей структуры матрицы инцидентов. В структуре матрицы инцидентов выделены неизменяемая и изменяемая часть. Реализована возможность параметризации изменяемой части, что позволило сформулировать задачу оптимизации. Апробирован подход к решению подобной задачи на основе комбинации метода покоординатного спуска и перебора. Он позволил существенно сократить пространство поиска, а также находить производственный план по заданному значению целевой функции. Разработанный способ решения задачи оптимального планирования производства развивает теорию сетей Петри, делает ее более пригодной для моделирования сложных систем с разветвленной структурой и большим количеством взаимных связей, содержит новый подход к оптимизации процессов в оперативно-календарном планировании. Недостатком можно считать зависимость результатов решения задачи от правильности интерпретации состояний модели и, соответственно, направления градиента функции.

Ключевые слова: временная сеть Петри, автоматизированный синтез модели, оптимизационно-имитационный подход, оперативно-календарное планирование, метод покоординатного спуска.

✉ Сочнев Алексей Николаевич
e-mail: a.n.sochnev@mail.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Задача предварительного планирования производства состоит в формировании расписания работы производственной системы в плановом периоде. Ее решение требует как временного упорядочения процесса, так и пространственного, т.е. закрепления используемых агрегатов и ресурсов [1]. Подход к решению этой задачи на основе имитационного моделирования и, в частности, сетей Петри эмпирически доказал свою состоятельность и достаточно высокую эффективность [2, 3]. Формирование структуры модели требует структурной определенности [4]. Поскольку назначение ресурсов для операций — результат решения задачи, то структурная определенность на начальном этапе в модели присутствует ограниченно. При наличии неопределенности в структуре сети используется механизм разрешения конфликтов на основе приоритетных правил [5]. Однако, этот способ усложняет имитационный эксперимент, особенно если приоритеты изменяются в ходе его проведения.

В представляемой работе предложен способ оптимального распределения ресурсов при составлении производственного расписания. Основная идея состоит в поиске наилучшей для выбранного критерия структуры матрицы инцидентности, связывающей операции (переходы) и используемые ресурсы (позиции). С целью сокращения пространства поиска и быстрого поиска решения применен вариант метода покоординатного спуска, учитывающий особенности задачи. В основу решения заложены идеи и теоретические положения оптимизационно-имитационного подхода [6, 7].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В исходных данных для планирования производства должна содержаться информация о структуре производственной системы, типах технологических процессов, обрабатываемых изделиях, ограничениях технологического или организационного характера и другая необходимая информация. В самом крат-

ком виде информация о плане производства приведена в табл. 1. Предусматривается обработка изделий пятнадцати типов, для каждого типа задается объем выпуска, размер передаточной партии, длительности выполнения технологических операций. Для краткости изложения эти данные в текст данной работы не добавлены.

В качестве объекта исследования выбран учебно-исследовательский гибкий производственный комплекс (УИ ГПК), расположенный на площадях СФУ. Технологически в системе реализуются операции токарной и фрезерной обработки. В структуре УИ ГПК можно выделить две гибкие производственные ячейки. Первая из них включает токарный станок № 1, робот-манипулятор М20П № 1, транспортное устройство № 1. Вторая представлена следующим оборудованием: токарный станок № 2, многоцелевой вертикальный станок 2254ВМФ4, робот-манипулятор М20П № 2, транспортное устройство № 2.

Таблица 1. Плановое задание на период
[Table 1. Planned task for the period]

№ изделия	Тип процесса	Тип модели
1, 2, 4, 9, 10, 12, 15	токарный (тип 1)	А
6, 7, 11	токарный (тип 2)	В
8, 13, 14	токарно-фрезерный (1)	С
3, 5	токарно-фрезерный (2)	Д

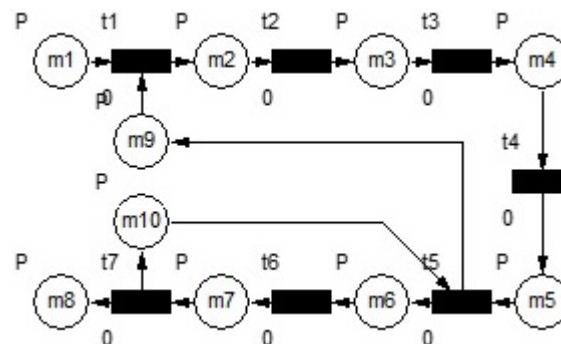
2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ

Структуру сетевой модели определяет матрица инцидентности позиций и переходов. В работе предложено синтезировать матрицу инцидентности из модульных частей, представляющих отдельные виды технологических процессов [2]. Для их создания выполняется предварительный анализ планового задания и групповых технологических процессов.

Технологические процессы изделий тестового примера могут быть представлены соответствующими моделями. Они обозначены по порядку следования: модель А, модель В, модель С и модель Д (рис. 1, табл. 1). Техно-

логические процессы различаются по типам выполняемых операций и количеству переустановок изделия. Выполняются технологические операции токарной и токарно-фрезерной обработки.

Интерпретация элементов моделей: $t1$ — установка заготовки, $t2$ — обработка токарная 1, $t3$ — переустановка, $t4$ — обработка токарная 2, $t5$ — переустановка, $t6$ — фрезерная обработка, $t7$ — перенос готового изделия, $m1$ — заготовки в накопителе, $m2$ — заготовки до обработки 1, $m3$ — изделия после обработки 1, $m4$ — изделия до токарной обработки 2, $m5$ — изделия после токарной обработки 2, $m6$ — изделия до фрезерной обработки, $m7$ — изделия после фрезерной обработки, $m8$ — готовые изделия в накопителе, $m9$ — занятость токарного станка, $m10$ — занятость фрезерного станка.



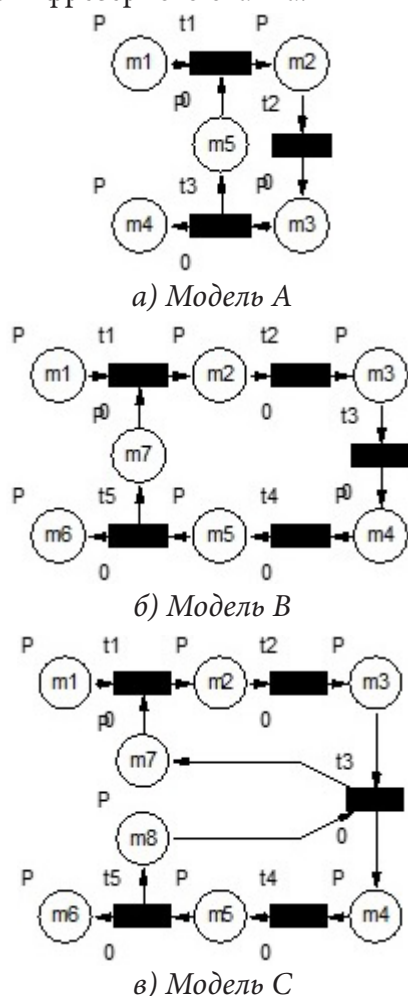
г) Модель D

Рис. 1. Модели технологических процессов
[Fig. 1. Process Models]

Функциональное назначение переходов и позиций в моделях В и С можно определить из представленного описания для моделей А и D. Матрицы инцидентий и начальные маркировки представленных сетевых моделей представлены в табл. 2.

Таблица 2. Матрицы инцидентий и начальная маркировка моделей
[Table 2. Incident matrices and initial labeling of models]

Модель А	
$BA = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x[0] = \begin{bmatrix} n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
Модель В	
$BB = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x[0] = \begin{bmatrix} n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$



в) Модель C

Модель C											
BC =					$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$						
x[0] =					$\begin{bmatrix} n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$						
Модель D											
BD =					$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$						
x[0] =					$\begin{bmatrix} n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$						

Общая матрица инцидентности формируется из представленных выше элементов, которые образуют ее главную диагональ.

$$B = \begin{bmatrix} B1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & B_j & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & B_n \end{bmatrix},$$

где B_j — матрица инцидентности технологического процесса j -го изделия, n — общее число типов изделий.

Для представляемой системы матрица инцидентности имеет следующий вид:

$$B = \begin{bmatrix} BA & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & BA & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & BD & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & BA & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & BC & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & BA \end{bmatrix}.$$

3. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

Вариативность производственных планов определяется выбором оборудования для выполнения операций и выбором изделий из множества в очереди. Множество ресурсов (оборудования) в сетевой модели производственной системы представляется множеством дополнительных позиций. Назначение конкретного оборудования для выполнения определенных операций выражается в формировании соответствующей матрицы инцидентности позиций (ресурсов) и переходов сетевой модели. Таким путем в общей матрице инцидентности сетевой модели формируются две части. Первая из них, определенная по технологическим процессам, является структурно детерминированной. Вторая часть, определяющая использование ресурсов, является вариативной, и ее структура может быть определена для конкретного их распределения по операциям. Формально, структура общей матрицы инцидентности, состоящей из двух частей, имеет вид.

$$D = \begin{bmatrix} B \\ R \end{bmatrix},$$

где B — детерминированная часть, R — вариативная часть.

Решение задачи планирования предполагает оптимизацию в соответствии с некоторым выбранным критерием оптимальности. В рассматриваемой задаче целевая функция зависит от матрицы инцидентности операций и ресурсов R .

$$Q(R) \rightarrow \max(\min)_{R \in R_T},$$

где R_T — множество допустимых значений R , определяемое технологическими и иными ограничениями системы.

С целью формализации процесса оптимизации предлагается задать значения элементов матрицы R функционально через некоторый вектор параметров x , определяющий вариант реализации процесса с конкретными ресурсами. Тогда, можно определить зависимости: $R = R(x)$ и $Q = f(R(x))$.

Решение оптимизационной задачи известными методами выполняется при определенном математическом описании функции $f(R(\mathbf{x}))$. В рассматриваемой задаче, на данном этапе ее можно задать только табличным образом, определив пары вектора параметров и результатов имитационных экспериментов с сетью. На основе имитации сети возможно организовать случайный поиск решения и в некоторых случаях это может быть достаточно для быстрого определения приемлемого решения. Если формулируется задача поиска оптимального решения или близкого к нему, то требуется адаптировать методы оптимизации для указанной задачи. Выбор метода должен быть обусловлен анализом результатов имитационных экспериментов. Указанный анализ показал сложную нелинейную зависимость $Q(\mathbf{x})$ и, соответственно, $\mathbf{x}(Q)$.

Предлагаемый подход может быть формализован в виде набора последовательных действий, перечисленных ниже.

1. Выделение множества позиций в сети Петри, моделирующих используемые ресурсы.
2. Определение матрицы инцидентности переходов сети Петри и позиций-ресурсов как функции $R(\mathbf{x})$ от параметров \mathbf{x} .
3. Формирование набора векторов – параметров \mathbf{x} . При отсутствии априорной или экспертной информации они формируются из случайных значений элементов.
4. Имитационные эксперименты для выбранных значений \mathbf{x} . Формирование наборов \mathbf{x} и $Q(\mathbf{x})$.
5. Эксперименты с имитационной моделью с целью определения вектора \mathbf{x} , оптимизирующего $Q(\mathbf{x})$.

4. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА

В соответствии с алгоритмом, описанным выше, выполнены следующие действия.

1. В общую модель процесса добавлены позиции, моделирующие занятость используемых агрегатов: станков и роботов. Общая модель имеет вид, представленный на рис. 2. Интерпретация элементов модели: $m101$ — ро-

бот-манипулятор № 1, $m102$ — токарный станок № 1, $m103$ — робот-манипулятор № 2, $m104$ — токарный станок № 2, $m105$ — обрабатывающий центр. Пронумерованы модели технологических процессов для деталей из таблицы (№ 1, 2, ..., 15). Для определения структуры матрицы инцидентности с ресурсами, зависимой от вектора параметров необходимо задать области допустимых значений функции и независимых переменных. В рассматриваемой системе вариативность процессов обеспечивается дублирующим оборудованием — токарными станками, следовательно, разные технологические маршруты могут быть не для всех деталей. В представленном примере — детали 1, 2, 4, 5, 7, 9, 10, 12, 15 могут иметь разные маршруты. Из чего следует, что размерность вектора параметров равна девяти. Диапазон значений параметров, очевидно, определяется количеством вариантов технологических маршрутов. В данной простой системе для каждого перечисленного типа изделия количество маршрутов равно двум. Делается допущение, что маршрут, устанавливается для всех деталей данного типа одинаковым и не изменяется в процессе моделирования. Таким образом на входе параметризация может осуществляться вектором следующего вида:

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9],$$

$$x_i \in \{0,1\}, \ i = 1,9.$$

2. Функция, формирующая структуру матрицы инцидентности, может быть получена из описания возможных технологических маршрутов. Для этого в структуре матрицы инцидентности выделяются элементы, соответствующие отдельным технологическим агрегатам, и связываются с позициями ресурсов. Например, технологический процесс для токарной обработки (модель А) включает две транспортные операции (установка, снятие) и одну технологическую (обработку). Обозначим функцию связи ресурса с транспортными операциями TA , для связи с операцией обработки — MA . Тогда можно определить функции $TA(x_1)$ и $MA(x_1)$ от параметра x_1 и задать значения этих функции. В рассматриваемом примере введен дополнительный вектор параметров $\mathbf{y}: y_i = \bar{x}_i, \ i = 1, n$ для удобства определения структуры матрицы \mathbf{R} .

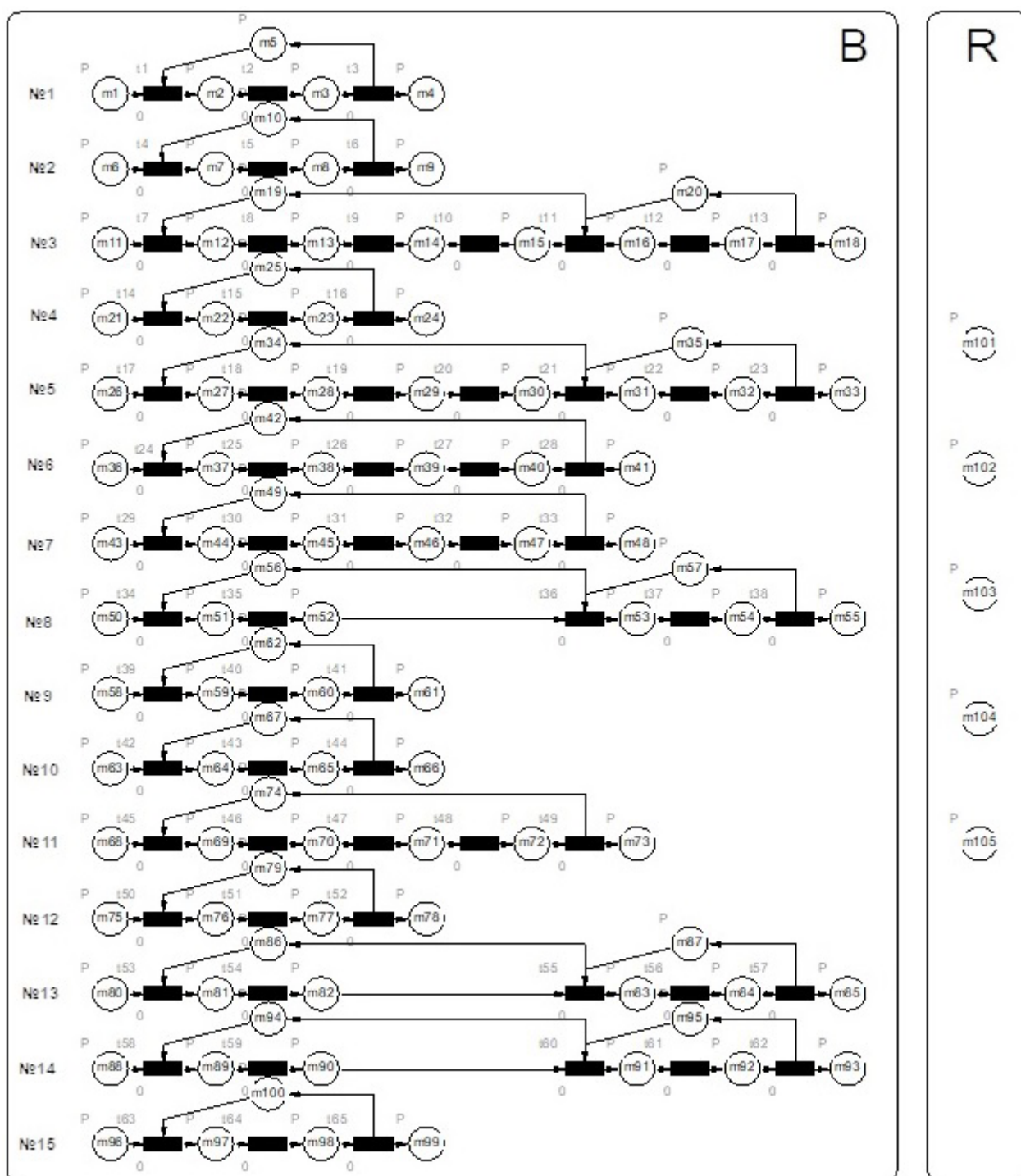


Рис.2. Общий вид сетевой модели производственного комплекса
[Fig. 2. General view of the network model of the production complex]

Интерпретация приведенных ниже значений: нулевые значения элементов вектора говорят о выборе другого ресурса, ненулевые — о выборе данного. Аналогичным образом определяется значения функций TB , MB , TC , MC , TD , MD .

$$TA(0) = [0 \ 0 \ 0], \quad TA(1) = [1 \ 0 \ 1],$$

$$MA(0) = [0 \ 0 \ 0], \quad TA(1) = [0 \ 1 \ 0],$$

$$TB(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0],$$

$$TB(1) = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]$$

$$MB(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0],$$

$$MB(1) = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0]$$

$$\begin{aligned} TC(0) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0], \\ TC(1) &= [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1] \\ MC(0) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0], \\ MC(1) &= [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0], \\ MC(2) &= [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0] \\ MD(0) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0], \\ MD(1) &= [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0], \\ MD(2) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]. \end{aligned}$$

Далее может быть задана структурная связь каждой позиции, моделирующей ресурса с элементами модели процессов. Построено, в матрице **R** функционально заданы эти связи.

$$\begin{aligned} R101(x) &= [TA(x_1) \ TA(x_2) \ TD(1) \ TA(x_3) \\ &\quad TD(1)...TB(x_4) \ TB(x_5) \ TC(1) \\ &\quad TA(x_6) \ TA(x_7)...TB(1) \ TA(x_8) \\ &\quad TC(1) \ TC(1) \ TA(x_9)] \\ R102(x) &= [MA(x_1) \ MA(x_2) \ MD(1) \ MA(x_3) \\ &\quad MD(1) \ MB(x_4) \ MB(x_5) \ MC(1) \\ &\quad MA(x_6) \ MA(x_7)...MB(1) \ MA(x_8) \\ &\quad MC(1) \ MC(1) \ MA(x_9)] \\ R103(x) &= [TA(y_1) \ TA(y_2) \ TD(1) \ TA(y_3) \\ &\quad TD(1)...TB(y_4) \ TB(y_5) \ TC(1) \\ &\quad TA(y_6) \ TA(y_7)...TB(1) \ TA(y_8) \\ &\quad TC(1) \ TC(1) \ TA(y_9)] \\ R104(x) &= [MA(y_1) \ MA(y_2) \ MD(2) \ MA(y_3) \\ &\quad MD(2)...MB(y_4) \ MB(y_5) \ MC(2) \\ &\quad MA(y_6) \ MA(y_7)...MB(1) \ MA(y_8) \\ &\quad MC(2) \ MC(2) \ MA(y_9)] \\ R105(x) &= [MA(y_1) \ MA(y_2) \ MD(3) \ MA(y_3) \\ &\quad MD(3)...MB(1) \ MB(1) \ MC(3) \\ &\quad MA(y_6) \ MA(y_7)...MB(1) \ MA(y_8) \\ &\quad MC(3) \ MC(3) \ MA(y_9)] \end{aligned}$$

3. Формирование начального набора векторов — параметров **x**. В рассматриваемом примере вектор сформирован случайным образом. При наличии экспертного опыта этот набор может быть выбран более рационально.

4. Проведены двадцать экспериментов при выбранных параметрах. Количество экспериментов в начальной серии может быть увеличено, что потенциально сократит последующий поиск. Определено значение целевой функции. В качестве целевой функции могут быть выбраны следующие критерии: минимизация времени процесса (*T*), максимизация загрузки оборудования, минимизация количества используемых ресурсов, максимизация выпуска продукции и т. д. Был выбран первый критерий, как наиболее популярный и несложно вычисляемый.

Технически, значение выбранного критерия вычисляется как итоговое модельное время после завершения имитационного эксперимента с временной сетью Петри, т. е., формально $T = \tau_n$, где τ_n — модельный момент завершения последнего срабатывающего перехода.

Таблица 3. Результаты начальных экспериментов

[Table 3. Results of initial experiments]

№	x	<i>T</i>
1	1 1 1 1 1 0 1 1 1	406
2	1 0 1 0 1 0 0 1 1	422
3	0 1 0 1 1 1 1 0 0	381
4	1 1 0 0 1 0 0 1 0	400
5	1 0 1 0 1 0 1 0 1	462
6	1 0 1 1 0 1 1 0 1	411
7	0 0 1 0 1 0 1 0 0	574
8	1 1 1 0 0 0 0 1 1	407
9	0 0 1 0 1 0 1 1 0	530
10	1 0 1 1 1 1 0 0 0	394
11	0 0 1 1 0 0 1 0 1	526
12	1 1 1 0 1 0 1 1 0	380
13	1 1 1 1 1 1 1 0 0	377
14	0 1 0 0 1 1 0 0 0	455
15	1 1 1 0 0 1 1 0 1	388
16	0 0 1 1 0 0 1 1 1	490
17	0 0 1 1 0 1 1 0 0	524
18	1 0 0 0 1 1 0 1 0	438
19	0 0 0 1 1 1 0 0 0	479
20	0 1 1 0 1 0 1 1 0	446

Сформированные результаты структурирования и параметризации имитационной модели позволяют перейти, собственно, к решению задачи оптимизации.

Наиболее очевидный способ решения — полный перебор вариантов с выполнением имитационных экспериментов. В рассматриваемом примере количество вариантов сравнительно небольшое ($2^9 = 512$), и метод полного перебора может быть применен, однако при увеличении размерности x и области варьирования каждого параметра данный метод не позволит найти решение за разумное время.

Для решения практических задач оптимального планирования производства апробирован подход совместного использования метода покоординатного спуска [8] и перебора, идея которого состоит в покоординатном движении в направлении градиента целевой функции. Отсутствие формулировки целевой функции приводит к тому, что направление градиента приходится определять на основе полученных результатов моделирования на каждом шаге.

Практически, для определения направления нужного изменения целевой функции в исходной выборке экспериментов выбираются несколько самых плохих и самых хороших результатов. В табл. 3 выделены, соответственно, наборы удачных и неудачных экспериментов. Количество опытов, включаемых в каждый набор, определяется исследователем с целью наиболее достоверного прогноза по изменению каждой компоненты вектора параметров и его влиянию на целевую функцию. Результат анализа вектора параметров для рассматриваемого примера можно представить следующим образом:

$$(1 \ 1 \ 1 \ X \ 1 \ 1 \ X \ X \ 0).$$

Каждая компонента представленного вектора получена следующим образом: либо выявлено, что она в целом не влияет на значение критерия, тогда ее значение не меняется, либо определяется ее значение, улучшающее целевую функцию. Знаком «X» отмечены элементы вектора, по которым имеется неопределенность. Поскольку на данном этапе не

понятен характер влияния на критерий этих параметров, то выполняются эксперименты при всех вариантах их значений, т.е. применяется метод перебора (табл. 4).

Наилучшее решение получено в результате эксперимента № 2. Близкое значение к результату, полученному нейронной сетью, косвенно указывает на близость к экстремуму.

Таблица 4. Результаты экспериментов
[Table 4. Experimental results]

№	x	T
1	1 1 1 0 1 1 0 0 0	374
2	1 1 1 0 1 1 0 1 0	339
3	1 1 1 0 1 1 1 0 0	368
4	1 1 1 0 1 1 1 1 0	349
5	1 1 1 1 1 1 0 0 0	369
6	1 1 1 1 1 1 0 1 0	415
7	1 1 1 1 1 1 1 0 0	377
8	1 1 1 1 1 1 1 1 0	419

Далее производится покоординатное движение по каждому элементу для исследования пространства поиска в окрестности точки экстремума (табл. 5).

Таблица 5. Результаты экспериментов
[Table 5. Experimental results]

№	x	T
1	0 1 1 0 1 1 0 1 0	385
2	1 0 1 0 1 1 0 1 0	422
3	1 1 0 0 1 1 0 1 0	353
4	1 1 1 1 1 1 0 1 0	415
5	1 1 1 0 0 1 0 1 0	397
6	1 1 1 0 1 0 0 1 0	379
7	1 1 1 0 1 1 0 0 0	349
8	1 1 1 0 1 1 0 1 1	388

Для рассматриваемого примера все новые значения критерия хуже, поэтому в качестве решения можно оставить вектор параметров, найденный на предыдущем шаге $x = (1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0)$. Значение целевой функции для указанного распределения параметров составило $Q(x) = 339$.

Особенности применяемых методов и отсутствие формально заданной функции $Q(x)$

не позволяют гарантировать оптимальность полученного решения, однако для практического использования при планировании производства это допустимо [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам работы над темой статьи могут быть сформулированы и обобщены следующие полученные результаты.

1. Метод автоматизированного синтеза общей сетевой модели с использованием набора моделей типичных производственных модулей. Набор таких моделей может быть расширен.

2. Способ оптимизации процессов через поиск структуры матрицы инцидентов сети Петри, параметризации отношений инцидентов в сети.

3. Подход к решению оптимизационной задачи модифицированными методами покоординатного спуска и перебора.

Перечисленные выше результаты в совокупности образуют применимый метод оптимального планирования производства. Применимость обоснована апробацией для типичной машиностроительной производственной системы. Обобщения по эффективности решения задачи планирования для разных по размеру и конфигурации систем можно будет сделать после дополнительных экспериментов. Узким местом при усложнении структуры производственной систем может стать трудоемкость анализа и выявления функциональной зависимости $Q(x)$.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Сочнев Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой робототехники и технической кибернетики Сибирского федерального университета.

E-mail: a.n.sochnev@mail.ru

ORCID id: <https://orcid.org/0000-0003-4733-6137>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смоляр Л. И. Оперативно-календарное планирование: (Модели и методы) / Л. И. Смоляр. – М. : Экономика, 1979. – 136 с.
2. Сочнев А. Н. Сетевые модели в системах управления производством (монография) / А. Н. Сочнев. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2014. – 162 с.
3. Корнеев А. М. Моделирование сложных технологических процессов с использованием сетей Петри / А. М. Корнеев, А. М. Наги // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 9-3. – С. 410–414.
4. Котов В. Е. Сети Петри / В. Е. Котов. – М. : Наука, 1984. – 160 с.
5. Григорьева Т. Е. Имитационное моделирование сетей Петри с приоритетами / Т. Е. Григорьева, В. М. Дмитриев // Сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии». – С. 246–247.
6. Цвиркун А. Д. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем / А. Д. Цвиркун, В. К. Акинфиев, В. А. Филиппов. – М. : Наука, 1985. – 173 с.
7. Хоботов Е. Н. Оптимизационно-имитационный подход к моделированию сложных систем. / Е. Н. Хоботов // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1996. – № 1. – С. 111–117.
8. Сухарев А. Г. Курс методов оптимизации / А. Г. Сухарев, А. В. Тимохов, В. В. Федоров. – М. : Наука, 1986. – 328 с.
9. Емельянов В. В. Оперативное управление в ГПС / В. Ф. Горнев, В. В. Емельянов, М. В. Овсянников. – М. : Машиностроение, 1990. – 253 с.

ISSUES OF GENERATION A PETRI NET BASED SIMULATION MODEL IN SOLVING THE TASK OF PRODUCTION PLANNING

© 2023 A. N. Sochnev✉

*Siberian Federal University
79, Svobodny Avenue, 660041 Krasnoyarsk, Russian Federation*

Annotation. The presented article presents a description of a systematic approach to solving the task of operational scheduling of production based on simulation modeling with timed Petri nets. The proposed approach is based on the idea of automated synthesis of network models of discrete production systems and the use of an optimization-simulation approach to find the best production plan. Based on the developed theoretical provisions, a test example is presented that characterizes the effect of their application. A typical production system of mechanical processing was chosen as the object of study. The formation of a general simulation model of the production process is carried out from models of the main types of technological processes, which greatly simplifies and speeds up this process. In the practice of using Petri nets, the complexity of developing models, interpreting them, and making changes are factors that significantly limit their use. In the process of solving the task of preliminary production planning, a new way of influencing the optimality criterion is defined and proposed for application by setting various incidence ratios in the Petri net. The optimization procedure is reduced to finding the best structure of the incidence matrix. In the structure of the incidence matrix, an unchanging and a changing part are distinguished. The possibility of parametrization of the variable part has been implemented, which made it possible to formulate the optimization problem. An approach to solving such a problem based on a combination of the method of coordinate-wise descent and enumeration has been tested. He allowed to significantly reduce the search space, as well as to find a production plan for a given value of the objective function. The developed method for solving the problem of optimal production planning develops the theory of Petri nets, makes it more suitable for modeling complex systems with a branched structure and a large number of interconnections, contains a new approach to optimizing processes in operational scheduling. The disadvantage is the dependence of the results of solving the problem on the correct interpretation of the states of the model and, accordingly, the direction of the gradient of the function.

Keywords: timed Petri net, automated model synthesis, optimization and simulation approach, operational scheduling, coordinate descent method.

CONFLICT OF INTEREST

The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Smolyar L. I. (1979) Operational calendar planning: (Models and methods). Moscow: Ekonomika. 136 p.
2. Sochnev A. N. (2014) Network models in production control systems (monography). Krasnoyarsk : Siberian Federal University. 162 p.
3. Korneev A. M. (2016) Modeling of complex technological processes with the use of Petri nets. *Modern high-tech technologies*. No. 9-3. P. 410–414.
4. Kotov V. E. (1984) Petri Nets. Moscow: Nauka. 160 p.
5. Grigorieva I. E. (2013) Simulation modeling of Petri nets with priorities. *Proceedings of the XIX International Scientific and Practical Conference "Modern engineering and Technologies"*. P. 246–247.

✉ Sochnev Aleksey N.
e-mail: a.n.sochnev@mail.ru

6. Tsvirkun A. D., Akinfiev V. K., Filippov V. A. (1985) Simulation modeling in the problems of synthesis of the structure of complex systems. Moscow : Nauka. 173 p.
7. Khobotov E. N. (1996) Optimization-simulation approach to modeling of complex systems. *Theory and control systems*. No. 1. P. 111–117.
8. Sukharev A. G., Timokhov A. V., Fedorov V. V. (1986) Course of optimization methods. Moscow : Nauka. 328 p.
9. Gornev V. F., Yemelyanov V. V., Ovsyanikov M. V. (1990) Operational control in FMS. Moscow : Mashinostroyenie. 253 p.

Sochnev Aleksey N. — Candidate of technical sciences, Associate Professor, Head of the Department of Robotics and Technical Cybernetics, Siberian Federal University.

E-mail: a.n.sochnev@mail.ru

ORCID id: <https://orcid.org/0000-0003-4733-6137>