

А. Н. Сочнев, канд. техн. наук, зав. каф. РИТК ПИ СФУ, asochnev@sfu-kras.ru,
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Оптимизационно-имитационный подход к оперативному управлению дискретным производством

Описан подход к решению задачи управления дискретным производством на основе эталонной имитационной модели. В качестве объекта исследования выбрана производственная система, представленная типичным технологическим оборудованием. Имитационная модель использует математический аппарат временных сетей Петри.

Сформирован и апробирован метод автоматизированного получения готовых к использованию моделей производства. В основу метода положена идея синтеза общей модели производственного процесса из моделей типовых технологических процессов. В практике применения сетей Петри сложность разработки, последующей интерпретации моделей, а следовательно, и внесения изменений — факторы, значимо сдерживающие их практическое использование.

Предложен новый способ влияния на критерий оптимальности через задание различных отношений инцидентий в сети Петри. В структуре матрицы инцидентий выделены неизменяемая и изменяемая части. Использован способ задания структуры изменяемой части через вектор параметров, что позволило использовать метаэвристический алгоритм поиска ее наилучшей структуры. Сформулирована задача оптимального планирования производства, определенная для описанного выше подхода. Биоинспирированный алгоритм прыгающих лягушек адаптирован к поиску наилучшей для заданного критерия оптимальности структуры сети. Изменения указанного алгоритма позволили сократить число шагов поиска и работать с параметрами дискретного типа. В процессе решения использован наиболее популярный критерий оптимальности. Полученные теоретические результаты находятся в рамках оптимизационно-имитационного подхода и являются его логическим развитием.

Разработанный подход к решению задачи оптимального управления производством развивает теорию сетей Петри, делает ее более пригодной для моделирования сложных систем с разветвленной структурой и большим числом взаимных связей. На основе разработанных теоретических положений представлен тестовый пример, характеризующий эффект от их применения. Определены рекомендации по практическому использованию предложенного подхода в смысле минимизации времени принятия управленческих решений с требуемой точностью.

Ключевые слова: сеть Петри, оптимизационно-имитационный подход, оперативно-календарное планирование, метаэвристические алгоритмы, алгоритм прыгающих лягушек

Введение

Результаты анализа структуры и характеристик позволяют классифицировать дискретное производство как сложную иерархическую систему с многовариантным поведением, обусловленным переменной структурой процессов [1, 2]. Отмеченное обстоятельство приводит к пониманию сложности задачи оптимального управления такой системой [3, 4]. Управляющее воздействие для подобных систем определяется, как правило, на основе экспериментов с имитационной моделью производства [5–7]. При этом точность и обоснованность анализа и управления зависят от того, насколько разработанные методы моделирования и сами модели адекватно представляют реальные процессы. Приведенные выше факторы обу-

словливают актуальность исследований в области математического моделирования производственных систем [8, 9].

Подход к решению этой задачи на основе экспериментов с имитационной сетевой моделью Петри эмпирически доказал свою состоятельность, но в то же время были выявлены и некоторые его недостатки [8, 10]. Для современных систем управления производством характерны высокие требования к скорости разработки и внесения изменений в модель. Быстро изменяющиеся рыночные условия также затрудняют своевременное и точное определение оптимального управляющего воздействия. Также появляются новые способы организации производства, например матричного типа, для которых задачи управления еще более усложняются [11, 12].

Принимая во внимание специфику дискретного производства как объекта управления, поиск оптимального управляющего воздействия рационально осуществлять на основе идей оптимизационно-имитационного подхода, предполагающего серию экспериментов с имитационной моделью [13, 14]. Предложено определять в ходе экспериментов структуру матрицы инцидентов поисковой процедурой в соответствии с заданной целевой функцией. Назначение ресурсов при планировании трансформировано в процесс формирования отношений инцидентности между операциями и ресурсами.

Задача управления дискретным производством

Дискретное производство представляется в виде объекта управления (рис. 1), характеризующегося следующими основными компонентами: вектором входных переменных x , выражающим номенклатуру и ассортимент (число) входных ингредиентов, вектором выходных переменных y , определяющим результат функционирования дискретного производства — объем изделий товарного выпуска, вектором переменных состояния z , отражающим число продуктов производства, имеющихся в распоряжении дискретной производственной системы на текущий момент управления, вектором возмущений e , вектором переменных управления u .

Процесс функционирования дискретного производства отображается математической моделью следующего вида [5]:

$$\begin{cases} z[k+1] = g(z[k], u[k], e[k]), \\ y[k] = f(x[k], u[k], e[k], z[k]), \end{cases}$$

где $g(z, u, e)$, $f(x, u, e, z)$ — нелинейные функции; k — номер интервала управления.

Процесс управления в производственной системе (ПС) является дискретным. Протекание производственного процесса (ПП) от момента k и далее зависит только от состояния ПС в этот момент времени и последующих значений управ-

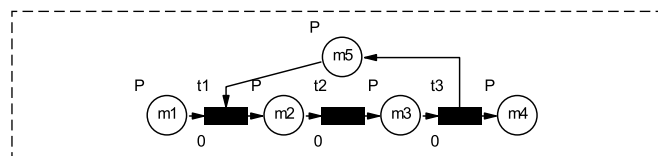


Рис. 1. Модель (А) токарной обработки (одна установка заготовки)

Fig. 1. Model (A) of turning processing (one workpiece set)

ления и возмущений и не зависит от того, как ПС пришла в это состояние, т. е. от предыстории ПП. Таким образом, состояние ПС в момент $k+1$ зависит только от ее состояния в k -й момент времени, действия управления и возмущения.

Основная задача системы управления дискретным производством состоит в реализации управления, направленного на организацию и последующее выполнение производственной программы u , обеспечивающей достижение определенной цели дискретного производства — приведение темпов производства продукции y в соответствие с запросами конечного потребителя.

Процесс функционирования системы управления дискретным производством сводится к реализации алгоритма управления, представляемого в виде последовательного выполнения фаз синтеза управления (предварительного планирования) дискретным производством, анализа его результатов и поддержания хода процесса в соответствии с запланированным. В данной работе рассмотрен подход к решению первой из перечисленных задач.

Задача предварительного планирования производства состоит в формировании расписания работы ПС. Ее решение требует как временного упорядочения процесса, так и пространственного. Временное упорядочение выражается в определении сроков начала и окончания выполнения работ, а пространственное — в назначении работ на определенное технологическое оборудование. Формально задача календарного планирования ставится следующим образом. Пусть на технологическом участке требуется обработать n деталей (или их партий). Задаются технологические маршруты. Совокупность чисел $P = \{t_{ij}^0\}$, удовлетворяющих ограничениям, называется календарным планом. Решение задачи календарного планирования заключается в отыскании неизвестных величин $\{t_{ij}^0\}$. Задача оптимального планирования заключается в отыскании такого плана P^* , который экстремизирует критерий эффективности и удовлетворяет ограничениям. В качестве критерия эффективности в рассматриваемом ниже примере используется минимизация времени выпуска заданного объема продукции

$$T(P) = t_{last}^k \rightarrow \min_{P \in \Omega_P},$$

где t_{last}^k — момент завершения последней планируемой операции; Ω_P — множество допустимых планов.

Таблица 1
Table 1

Плановое задание на период
Planned task for the period

№ изделия	Тип процесса	Тип модели
1, 2, 4, 9, 10, 12, 15	Токарный (тип 1)	<i>A</i>
6, 7, 11	Токарный (тип 2)	<i>B</i>
8, 13, 14	Токарно-фрезерный (тип 1)	<i>C</i>
3, 5	Токарно-фрезерный (тип 2)	<i>D</i>

Задача планирования решается на примере исследуемого роботизированного гибкого производственного комплекса (ГПК). В его структуре присутствуют токарные и фрезерные станки и предусмотрено выполнение технологических процессов токарной, фрезерной и токарно-фрезерной обработки. Определен набор технологических процессов и параметры операций для изделий, введены модельные обозначения технологических процессов (*A*, *B*, *C*, *D*) (табл. 1).

Важная проблема практических задач планирования — сложность аналитического определения целевой функции. Часто задача определяется как многокритериальная. В таких случаях фактическое значение показателей эффективности плана целесообразно определять по результату имитационного эксперимента с моделью производства. В качестве основы для формирования имитационной математической модели выбраны временные сети Петри.

Синтез сетевой модели системы

Структура модели на основе сети Петри определяется матрицей инцидентности позиций и переходов. Матрицу инцидентности предлагается синтезировать в частично автоматизированном режиме. Общая модель составляется из модульных частей, представляющих отдельные виды производственных структур для типичных технологических маршрутов [15, 16]. В целях создания таких моделей выполнен предварительный анализ производственного задания и группировка изделий по типу.

Технологические процессы, описанные выше, могут быть представлены структурами следующих видов. Они обозначены по порядку следо-

вания: модель *A*, модель *B*, модель *C* и модель *D* (рис. 1, 2, 3 и 4).

Интерпретация элементов сети Петри: *t1* — операция установки заготовки, *t2* — токарная обработка, *t3* — переустановка, *t4* — токарная обработка, *t5* — перенос на фрезерный станок, *t6* — фрезерная обработка, *t7* — перенос готового изделия в накопитель, *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.

Для представляемой ПС матрица инцидентностей синтезируется из матриц моделей, приведенных выше, и имеет вид

$$B = \begin{bmatrix} B1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B1 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B1 \end{bmatrix},$$

где *B1*, *B2*, *B3*, *B4* — матрицы инцидентностей моделей *A*, *B*, *C*, *D* соответственно.

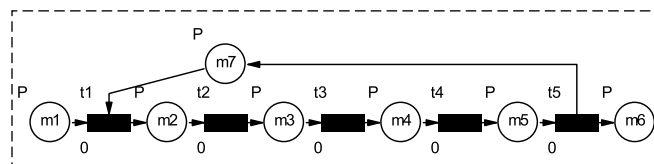


Рис. 2. Модель (B) токарной обработки (две установки заготовки)

Fig. 2. Model (B) of turning processing (two workpiece sets)

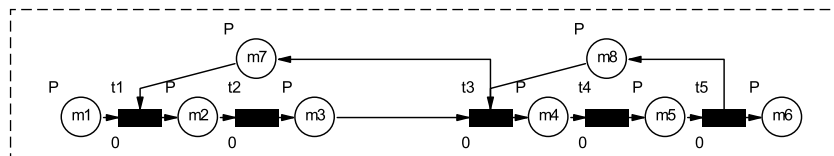


Рис. 3. Модель (C) токарно-фрезерной обработки (одна установка)

Fig. 3. Model (C) turning-milling processing (one set)

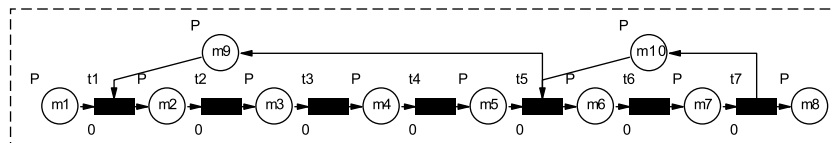


Рис. 4. Модель (D) токарно-фрезерной обработки (две установки)

Fig. 4. Model (D) turning-milling processing (two sets)

Вариативность производственных планов определяется выбором оборудования для выполнения операций и выбором изделий из множества в очереди. Множество ресурсов (оборудования) в сетевой модели ПС представляется множеством дополнительных позиций. Назначение конкретного оборудования для выполнения определенных операций выражается в формировании соответствующей матрицы инцидентности позиций (ресурсов) и переходов сетевой модели. Таким образом, в общей матрице инцидентий сетевой модели формируются две части. Первая из них определяется в соответствии с описанным выше методом и является структурно детерминированной. Вторая часть, задающая использование ресурсов, является вариативной, и ее структура может быть определена для их конкретного 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.

В соответствии с представленной идеей структурирования модели выполнены следующие действия.

1. В модель процесса добавлены позиции, моделирующие занятость используемых агрегатов — станков и роботов. Общая модель представлена на рис. 5. Интерпретация элементов модели: m101 — робот-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).

2. Для определения структуры матрицы инцидентий с ресурсами, зависимой от вектора параметров, заданы 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 общей номенклатуре девять деталей могут иметь разные маршруты. Следовательно, размерность вектора параметров равна девяти. Диапазон значений параметров, очевидно, определяется числом вариантов технологических маршрутов. В данной простой системе для каждого перечисленного типа изделия число маршрутов равно двум. Делается допущение, что маршрут устанавливается для всех деталей данного типа одинаковым и не изменяется в процессе моделирования. Таким образом, параметризация может осуществляться вектором следующего вида:

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

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

Функция, формирующая структуру матрицы инцидентий, может быть получена из описания возможных технологических маршрутов. В структуре матрицы инцидентий выделяются элементы, соответствующие отдельным технологическим агрегатам, и связываются с пози-

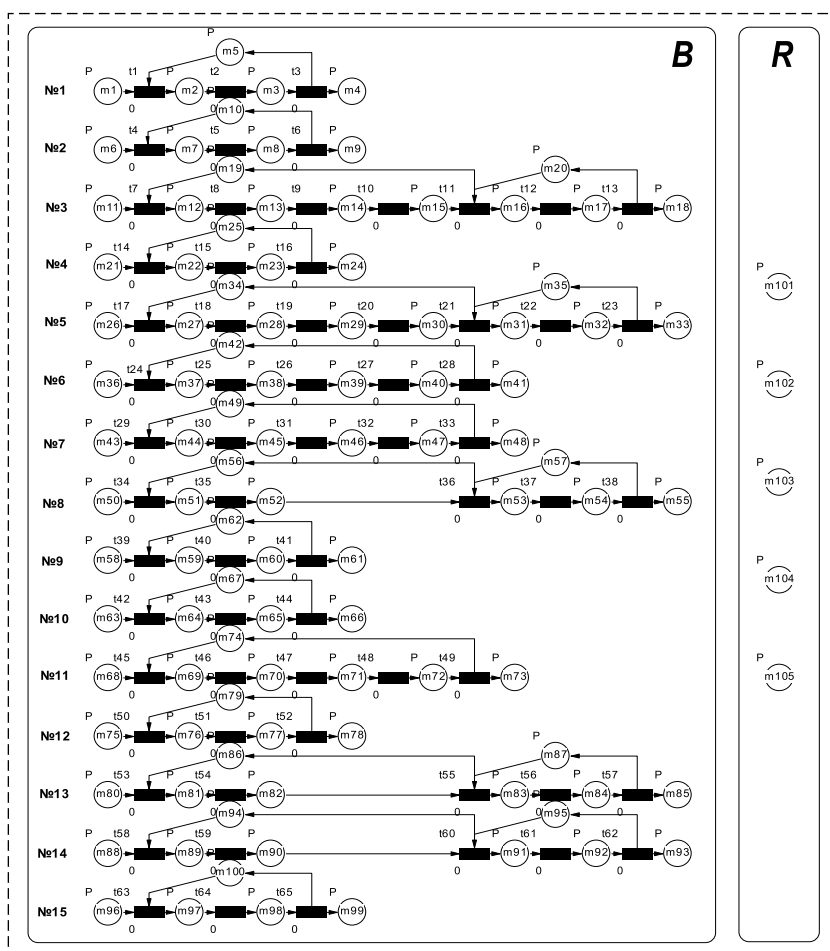


Рис. 5. Общий вид сетевой модели
Fig. 5. General view of the net model

циями ресурсов. Например, технологический процесс для токарной обработки (модель A) включает две транспортные операции (установка, снятие) и одну технологическую (обработку). Обозначим TA функцию связи ресурса с транспортными операциями, функцию для связи с операцией обработки — MA . Тогда можно определить функции $TA(x_i)$ и $MA(x_i)$ от параметра x_i и задать значения этих функций. В рассматриваемом примере введен дополнительный вектор параметров y : $y_i = \text{not}(x_i)$, $i = 1, n$, для удобства определения структуры матрицы R .

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

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

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

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

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

$$TC(0) = [0\ 0\ 0\ 0\ 0],\ TC(1) = [1\ 0\ 1\ 0\ 1],$$

$$MC(0) = [0\ 0\ 0\ 0\ 0],\ MC(1) = [0\ 1\ 0\ 0\ 0],$$

$$MC(2) = [0\ 0\ 0\ 1\ 0],$$

$$MD(0) = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0],\ MD(1) = [0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0],$$

$$MD(2) = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0].$$

После этого может быть задана структурная связь каждой позиции, моделирующей ресурсы, с элементами модели процессов. В матрице R функционально эти связи заданы построчно:

3. Формирование набора векторов-параметров x . В рассматриваемом примере вектор сформирован случайным образом. При наличии априорной информации о системе начальные значения выбираются на основе ее анализа.

4. В качестве целевой функции могут быть выбраны следующие критерии: минимизация времени процесса, максимизация загрузки оборудования, минимизация количества используемых ресурсов, максимизация выпуска продукции и т. д. Ранее был выбран первый критерий как наиболее типичный. В рамках описываемого подхода целевая функция определяется 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. В целях формализации процесса поиска решения значения элементов матрицы R были заданы функционально через вектор параметров x , определяющий вариант реализации процесса с конкретными ресурсами. Соответственно, определены зависимости $R = R(x)$ и $Q = f(R(x))$.

5. Проведены двадцать экспериментов при выбранных параметрах. Определено значение целевой функции. Полученные значения далее интерпретируются как первоначальная популяция (табл. 2).

$$R101(x) = [TA(x_1)\ TA(x_2)\ TD(1)\ TA(x_3)\ TD(1)\ TB(x_4)\ TB(x_5)\ TC(1)\ TA(x_6)\ TA(x_7)\ TB(1)\ TA(x_8)\ TC(1)\ TC(1)\ TA(x_9)]$$

$$R102(x) = [MA(x_1)\ MA(x_2)\ MD(1)\ MA(x_3)\ MD(1)\ MB(x_4)\ MB(x_5)\ MC(1)\ MA(x_6)\ MA(x_7)\ MB(1)\ MA(x_8)\ MC(1)\ MC(1)\ MA(x_9)]$$

$$R103(x) = [TA(y_1)\ TA(y_2)\ TD(1)\ TA(y_3)\ TD(1)\ TB(y_4)\ TB(y_5)\ TC(1)\ TA(y_6)\ TA(y_7)\ TB(1)\ TA(y_8)\ TC(1)\ TC(1)\ TA(y_9)]$$

$$R104(x) = [MA(y_1)\ MA(y_2)\ MD(2)\ MA(y_3)\ MD(2)\ MB(y_4)\ MB(y_5)\ MC(2)\ MA(y_6)\ MA(y_7)\ MB(1)\ MA(y_8)\ MC(2)\ MC(2)\ MA(y_9)]$$

$$R105(x) = [MA(y_1)\ MA(y_2)\ MD(3)\ MA(y_3)\ MD(3)\ MB(1)\ MB(1)\ MC(3)\ MA(y_6)\ MA(y_7)\ MB(1)\ MA(y_8)\ MC(3)\ MC(3)\ MA(y_9)]$$

Таблица 2
Table 2

Результаты имитационных экспериментов
Results of simulation experiments

№ эксперимента	x	$T(P)$	№ эксперимента	x	$T(P)$
1	1 1 1 1 1 0 1 1 1	406	8	1 1 1 0 0 0 0 1 1	407
3	0 1 0 1 1 1 1 0 0	381	13	1 1 1 1 1 1 1 0 0	377
...	...	...	...	...	...
7	0 0 1 0 1 0 1 0 0	574	20	0 1 1 0 1 0 1 1 0	446

Решение оптимизационной задачи реализовано методом, имитирующим поведение лягушек в поисках пищи (*Shuffled Frog-Leaping Algorithm*) [17, 18]. Основная идея подобных методов — это взаимодействие между собой множества агентов системы "роевого" интеллекта, которые обмениваются информацией в целях приближения к оптимальному решению. Реализуется переход от популяции к популяции, которые представляют множество лягушек, образующих несколько непересекающихся множеств, называемых стаями. Внутри стай проводится улучшение целевой функции путем изменения положения наихудшей лягушки по следующему правилу:

$$x_{-}[k + 1] = x_{-}[k] + rand \cdot (x_{+}[k] - x_{-}[k]),$$

где $x_{-}[k]$ — наихудшее значение в стае; $x_{+}[k]$ — наилучшее значение в стае; $rand$ — случайный вектор, элементы которого равномерно распределены на отрезке $[0; 1]$; $\cdot$ — поэлементное произведение векторов по Адамару. Сравнение проводится на основе критерия $T(P)$. Если полученное решение $x_{-}[k + 1]$ лучше, чем наихудшее $x_{-}[k]$, то оно заменяет его. Если нет, то находится новое положение наихудшей лягушки по представленной выше формуле, где вместо наилучшего решения внутри стаи используется наилучшее среди всех лягушек в популяции. После завершения локального поиска деление популяции на стаи проводится заново. Процедура поиска завершается при достижении максимального числа итераций.

Особенности задачи календарного планирования производства потребовали доработки метода прыгающих лягушек в направлении сокращения числа шагов поиска. Были выполнены следующие модификации используемого метода оптимизации в сравнении с его описанием, представленным в литературе [19, 20].

1. Скорректировано правило изменения положения наихудшей лягушки:

$$\begin{aligned} x_{-}[k + 1] &= x_{-}[k] + \Delta x; \\ \Delta x_i &= rand[0; 1], \text{ если } i \in I, \end{aligned}$$

где $rand[0; 1]$ — генератор случайных чисел с двоичным выходом $\{0; 1\}$; I — множество изменяемых компонент вектора x .

Изменения проведены, поскольку поиск отношений инцидентности элементов сети Петри — задача дискретного типа. Кратности дуг

сети могут быть только целыми числами. Важная особенность рассматриваемого примера состоит еще и в двоичном характере изменения компонент вектора x .

2. Множество изменяемых компонент содержит элементы вектора x , изменяемые на текущем шаге. Предложено изменять скорость приближения к экстремуму целевой функции, меняя число пересчитываемых элементов вектора x от n до 1, что будет уже частично соответствовать покоординатному движению.

3. Для уменьшения числа опытов особи не делятся на мемплексы (стаи), оптимизационная процедура реализована в рамках одной группы. Основания такого решения — предполагаемое небольшое пространство поиска для решаемой задачи, одна точка глобального оптимума, высокие требования к скорости и низкие — к точности решения. Для более сложных производственных систем рекомендуется оставить деление на стаи, поскольку это является эффективным механизмом глобального поиска. Поэтому, в общем случае, процедура является метаэвристической.

4. Периодически, также в целях ускорения поиска, выполняется сокращение числа особей в стае. Формальным признаком возможного сокращения является появление большого числа лягушек с близкими (не минимальными) значениями целевой функции.

5. Изменен критерий остановки поиска. Поиск останавливается при локализации всех лягушек в некоторой локальной области. Формально такая локализация обнаруживается сильным уменьшением дисперсии значений $Q(x)$ относительно среднего значения.

Ниже представлены результаты решения описанной задачи для тестового примера. Значения векторов параметров и соответствующих значений целевой функции сведены в таблицу (табл. 3). Для краткости записи убраны векторы, которые не изменяются на текущем шаге. Фоном на каждом шаге отмечены изменяемые (наихудшие) особи. В процессе решения проведено сокращение популяции. Граница, по которой отсеяны векторы, выбрана с целью оставить не более половины стаи. На финальной стадии поиска отмечается концентрация в некоторой области, которая, очевидно, содержит локальный или глобальный экстремум. В качестве результата решения выбирается седьмой вектор параметров, формирующий наилучшее значение критерия оптимальности.

При практическом применении предложенного подхода на финальном этапе осуществля-

Промежуточные и конечные состояния параметров
Intermediate and final parameter states

Шаг № 1			Шаг № 10			Конечное состояние		
№ эксп.	x	$T(P)$	№ эксп.	x	$T(P)$	№ эксп.	x	$T(P)$
7	1 1 1 0 1 1 1 0 1	356	2	0 1 0 0 1 1 0 0 0	455	1	1 0 1 1 1 0 1 1 1	357
9	0 0 1 0 1 0 1 1 0	530	18	1 1 1 1 1 1 0 0 0	369	7	0 1 1 1 1 0 0 1 1	342

ются анализ полученного решения, его интерпретация, анализ устойчивости к изменениям, а также другие исследования, выходящие за рамки данной работы.

Заключение

По итогам работы получены следующие научно-практические результаты.

1. Предложено синтезировать сетевую модель производственного процесса в частично автоматизированном режиме с использованием набора моделей типичных технологических процессов.

2. Апробирован способ исследования и оптимизации процессов на основе поиска структуры матрицы инцидентов сети Петри. Определен вариант параметризации отношений инцидентов в сети.

3. Выявлены возможности применения в рамках решения описанной задачи оптимизационно-имитационного подхода. Исследован алгоритм прыгающих лягушек для поиска отношений инцидентов в сети, оптимизирующих выбранный критерий. Модифицированы параметры выбранного поискового алгоритма оптимизации с учетом особенностей задачи.

4. Сформулированные идеи апробированы на примере типичной машиностроительной производственной системы.

Перечисленные выше результаты в совокупности образуют применимый подход к созданию системы оптимального управления производством. Обобщения по эффективности решения задачи планирования для разных по размеру и конфигурации систем можно будет сделать после дополнительных экспериментов. Узким местом при увеличении масштабов системы может стать вопрос роста числа экспериментов и соответствующее увеличение вычислительных затрат и, как итог, времени решения задачи.

Список литературы

1. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.

2. Дальниченко И. А., Мясников В. И., Четвериков В. Н. Автоматизированные системы управления предприятиями. М.: Машиностроение, 1984. 360 с.

3. Горнев В. Ф., Емельянов В. В., Овсянников М. В. Оперативное управление в ГПС. М.: Машиностроение, 1990. 256 с.

4. Смоляр Л. И. Оперативно-календарное планирование (модели и методы). М.: Экономика, 1979. 136 с.

5. Воробьев С. А. Планирование и управление дискретным производством на основе временных сетей Петри с переменной нагрузкой: Дис. канд. техн. наук: 05.13.14. Красноярск, Изд-во КГТУ, 2002. 149 с.

6. Макаров И. М., Рахманкулов В. З., Назаретов В. М. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. Кн. 3. Управление робототехническими системами и гибкими автоматизированными производствами: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1986. 159 с.

7. Сочнев А. Н. Сетевые модели в системах управления производством: монография. Красноярск: СФУ, 2013. 157 с.

8. Зайцев Д. А. Решение задач оперативного управления дискретным производством на основе сетевых моделей Петри: Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев: Институт кибернетики им. В. М. Глушкова, 1991. 12 с.

9. Корнеев А. М., Наги А. М. Моделирование сложных технологических процессов с использованием сетей Петри // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 9-3. С. 410–414.

10. Котов В. Е. Сети Петри. М.: Наука, 1984. 160 с.

11. Greschke P., Schonemann M., Thiede S., Herrmann C. Matrix structures for high volumes and flexibility in production systems // Procedia CIRP 17. 2014. P. 160–165.

12. Feldkamp N., Bergmann S., Straburger S. Modelling and Simulation of Modular Production Systems // ASIM-Conference Simulation in Production and Logistics. 2019. P. 391–401.

13. Цвиркун А. Д., Акинфиев В. К., Филиппов В. А. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем. М.: Наука, 1985. 173 с.

14. Хоботов Е. Н. Оптимизационно-имитационный подход к моделированию сложных систем // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1996. № 1. С. 111–117.

15. Feldmann K., Colombo A. W. Monitoring of flexible production systems using high-level Petri net specifications // Control Engineering Practice. 1999. N. 7. P. 1449–1466.

16. Basile F., Carbone C., Chiacchio P. An approach to enforce disjunction of GMECs on controlled Petri nets // Proceedings of the IEEE International Conference on Systems Man. and Cybernetics. 2003. P. 1852–1859.

17. Narimani M. R. A New Modified Shuffle Frog Leaping Algorithm for Non-Smooth Economic Dispath // World Applied Sciences Journal. 2011. P. 803–814.

18. Орловская Н. М. Анализ эффективности биоинспирированных методов глобальной оптимизации // Электронный журнал "Труды МАИ". 2020. № 73. С. 1–22.

19. Vakil Baghmisheh M. T., Madani K., Navarbf A. A discrete shuffled frog optimization algorithm // Artificial Intelligence Review. 2011. Vol. 36. P. 267–284.

20. Farsangi M., Barati M. Solving unit commitment problem by a binary shuffled frog leaping algorithm // IET Generation Transmission & Distribution. 2014. Vol. 8, N. 6. P. 1050–1060.

Simulation Petri Net Model in the Tasks of Operational Control of Discrete Production

A. N. Sochnev, asochnev@sfu-kras.ru,

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

Corresponding author: Sochnev A. N., Cand. of Tech. Sci., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: asochnev@sfu-kras.ru

Accepted on March 04, 2022

Abstract

The presented article describes the approach to solving the task of discrete production control based on the reference imitation model. A discrete production system, represented by typical technological equipment, was chosen as the object of research. The simulation model uses the mathematical apparatus of temporary Petri nets. A method for automated synthesis of ready-to-use production models has been formed and tested. The method is based on the idea of synthesizing a production process model from models of typical technological processes. In the practice of applying Petri nets, the complexity of developing, subsequent interpretation of models, and, consequently, making changes are factors that significantly hinder their practical use. A new way of influencing the criterion is proposed by setting different incidence ratios in the Petri net. In the structure of the incidence matrix, the invariable and variable parts are distinguished. A method for specifying the structure of the variable part through the vector of parameters is described, which made it possible to use a metaheuristic algorithm for finding its best structure. The problem of optimal production planning defined for the approach described above is formulated. The bioinspired algorithm of jumping frogs is adapted to the search for the best network structure for a given optimality criterion. Changes in the specified algorithm made it possible to reduce the number of search steps, as well as work with discrete type parameters. In the process of solving, the most popular optimality criterion was used. The obtained theoretical results are within the framework of the optimization-simulation approach and are its logical development. The developed approach to solving the problem of optimal production control develops the theory of Petri nets, makes it more suitable for modeling complex systems with a branched structure and a large number of interconnections. On the basis of the developed theoretical provisions, a test example is presented that characterizes the effect of their application. Recommendations for the practical use of the proposed approach in the sense of minimizing the time for making managerial decisions with the required accuracy are determined.

Keywords: Petri net, optimization-simulation approach, operational scheduling, metaheuristic algorithms, shuffled frog-leaping algorithm

For citation:

Sochnev A. N. Simulation Petri Net Model in the Tasks of Operational Control of Discrete Production, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 6, pp. 309–316.

DOI: 10.17587/mau.23.309-316

References

1. Mesarovic M., Mako D., Takahara I. Theory of hierarchical multilevel systems, Moscow, Mir, 1973, 344 p. (in Russian).
2. Dalnichenko I. A., Myasnikov V. I., Chetverikov V. N. Automated control systems for enterprises, Moscow, Mashinostroenie, 1984, 360 p. (in Russian).
3. Gornev V. F., Emelyanov V. V., Ovsyannikov M. V. Operational management in FMS, Moscow, Mashinostroenie, 1990, 256 p. (in Russian).
4. Smolyar L. I. Operational scheduling: (Models and methods), Moscow, Ekonomika, 1979, 136 p. (in Russian).
5. Vorobyov S. A. Planning and control of discrete production based on temporary Petri nets with variable load: Dis. cand. tech. Sciences: 05.13.14, Krasnoyarsk, Publishing House of KSTU, 2002, 149 p. (in Russian).
6. Makarov I. M., Rakhmankulov V. Z., Nazaretov V. M. Robotics and flexible automated production: In 9 books. Book. 3. Management of robotic systems and flexible automated production, Moscow, Vyssh. school, 1986, 159 p. (in Russian).
7. Sochnev A. N. Net models in production control systems (monograph), Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2014, 162 p. (in Russian).
8. Zaitsev D. A. Solution of tasks of operational control of discrete production based on Petri net models: Abstract of the thesis. dis. cand. tech. sciences, Kiev, Institut kibernetiki im. V. M. Glushkova, 1991, 12 p. (in Russian).
9. Korneev A. M., Nagi A. M. Modeling of complex technological processes using Petri nets, *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2016, no. 9-3, pp. 410–414 (in Russian).
10. Kotov V. E. Petri Nets, Moscow, Nauka, 1984, 160 p. (in Russian).
11. Greschke P., Schonemann M., Thiede S., Herrmann C. Matrix structures for high volumes and flexibility in production systems, *Procedia CIRP* 17, 2014, pp. 160–165.
12. Feldkamp N., Bergmann S., Straburger S. Modeling and Simulation of Modular Production Systems, *ASIM-Conference Simulation in Production and Logistics*, 2019, pp. 391–401.
13. Tsvirkun A. D., Akinfiyev V. K., Filippov V. A. Simulation modeling in problems of synthesizing the structure of complex systems, Moscow, Nauka, 1985, 173 p. (in Russian).
14. Khobotov E. N. Optimization and simulation approach to modeling complex systems, *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 1996, no. 1, pp. 111–117 (in Russian).
15. Feldmann K., Colombo A. W. Monitoring of flexible production systems using high-level Petri net specifications, *Control Engineering Practice*, 1999, no. 7, pp. 1449–1466.
16. Basile F., Carbone C., Chiacchio P. An approach to enforce disjunction of GMECs on controlled Petri nets, *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems Man. and Cybernetics*, 2003, pp. 1852–1859.
17. Narimani M. R. A New Modified Shuffle Frog Leaping Algorithm for Non-Smooth Economic Dispath, *World Applied Sciences Journal*, 2011, no. 1, pp. 803–814.
18. Orlovskaya N. M. Analysis of the effectiveness of bioinspired methods of global optimization, *Elektronnyy zhurnal "Trudy MAI"*, 2020, no. 73, pp. 1–22 (in Russian).
19. Vakil Baghmisheh M. T., Madani K., Navarbafe A. A discrete shuffled frog optimization algorithm, *Artificial Intelligence Review*, 2011, vol. 36, pp. 267–284.
20. Farsangi M., Barati M. Solving unit commitment problem by a binary shuffled frog leaping algorithm, *IET Generation Transmission & Distribution*, 2014, vol. 8, no. 6, pp. 1050–1060.