УДК 681.322

В. В. Цехановский, В. Д. Чертовской
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Системное исследование процессов в адаптивной автоматизированной системе управления производством

Показано, что адаптивную автоматизированную систему управления производством можно представить в виде трех иерархически связанных блоков. Два верхних блока используют однородный метод, нижний блок – однородный метод и сети Петри. Приведено математическое описание блоков, на основе которого построены соответствующие программы. Для двух верхних блоков предложена реализация в виде задач статического и динамического линейного программирования. Для описания нижнего уровня использованы как задача статического линейного программирования, так и алгоритм сетей Петри. Рассмотрены числовые примеры для отдельных структурных элементов. Показана возможность генерации числовых данных для последовательной цепочки структурных элементов системы.

Адаптация, автоматизированное управление, однородный метод, сети Петри

В последнее время перспективным является использование в корабле- и машиностроении адаптивных автоматизированных систем управления производством.

Разработка автоматизированных систем управления до недавнего времени проводилась для плановых экономических отношений, характеризующихся относительной стабильностью процессов во внешней среде.

С переходом к рыночным отношениям динамичность внешней среды резко возросла [1], [2]. Влияние среды сказывается на изменении таких параметров, как спрос, цена, ресурсное обеспечение.

Повысить конкурентоспособность производств серийного типа позволяет режим оперативного перехода на выпуск новой продукции. Основной особенностью этого режима является изменение цели функционирования системы в процессе ее работы. Изменения цели компенсируются изменением структурных связей системы. Иными словами, требуется построение адаптивных систем управления.

Рассматриваемый класс адаптивных систем, в которых цель изменяется извне, получил в работе [1] название интеллектных. Такой класс систем является достаточно новым, требующим построения системного математического описания процессов в них.

Математические методы, использовавшиеся при изучении плановой экономики, уже не в полной мере удовлетворяют новым требованиям.

Постановка задачи. Формирование теории интеллектных систем возможно только с помощью системных исследований.

Для исследования напрямую выбрана совокупность подсистем технико-экономического планирования и оперативного управления основным производством при подсистемном представлении или бизнес-процесс «Производство» при процедурном представлении изучаемой автоматизированной системы управления производством.

Решение задачи. Результат исследования структуры подобных реальных систем [1], [2] позволяет зафиксировать многоуровневый характер структуры с большим числом уровней. Такую общую структуру можно представить в виде рис. 1, где 0 – цехи; 1 – начальники цехов; 2 – диспетчер; 3 – руководство; 0а – участки; 1а – начальники участков; 2а – цепочки участков; 3а – начальник цеха; 0б – согласование работы элементов в пределах выпуска одного вида продукции или партии однотипной продукции (один цикл); 1б – согласование работы элементов в пределах выпуска партии однотипной продукции при наличии циклов для нескольких видов ресурсов;

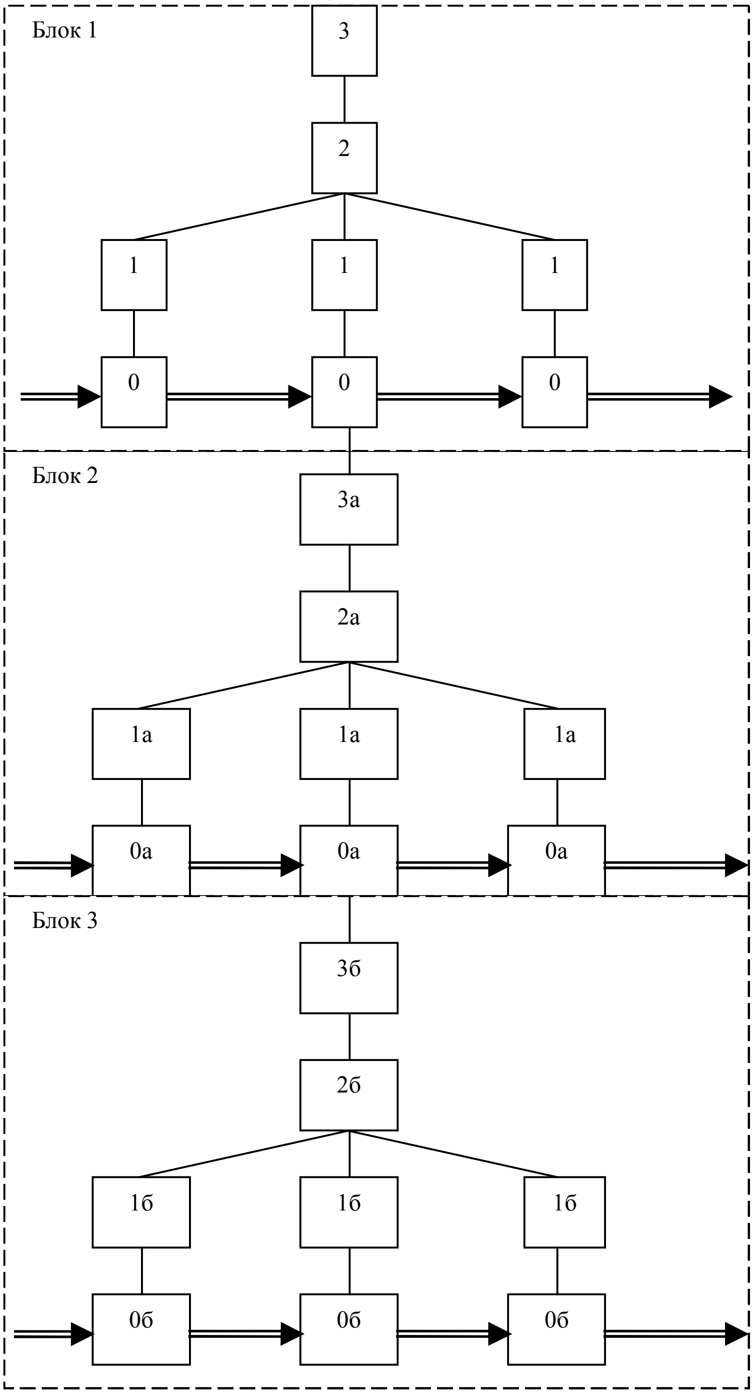

Рис. 1

2б – организация работы системы элементов в пределах выпуска одного вида продукции или партии разнотипной продукции с пересекающимися циклами для разных видов ресурсов; 3б – начальник участка.

А. *Структура системы.* Характерной ее особенностью является изменение масштабов по координатам и времени при переходе с одного уровня на другой. Внимательный анализ структуры позволил выделить 2 «однотипных» блока (блоки 1 и 2).

Блок 3 определяет одноуровневую систему.

Такое представление позволяет успешно интегрировать методы непрерывной и дискретной математики.

Б. *Описание системы.* Рассмотрим детально специфику трехуровневых блоков.

I. В выявленной трехуровневой структуре блоков учтены все возможные изменения по координатам и времени (рис. 1).

Использование двух трехуровневых блоков 1 и 2 объясняется тем, что в описании структур с четырьмя и более уровнями возникают серьезные затруднения в силу слишком большой разницы масштабов по времени самого верхнего и самого нижнего уровней.

В каждом структурном элементе таких блоков выделяются процессы планирования и управления, связанные в цикле управления и разные по своей сути.

Оптимизацию названных многомерных процессов можно обеспечить последующей компьютерной реализацией описания, при этом экономический интерес и динамические свойства могут быть определены выбранными критериями. В то же время должна быть учтена информационная неопределенность процесса управления.

Таким образом, как в отдельном структурном элементе, так и при взаимодействии элементов должны сочетаться экономические и динамические свойства.

Для структуры характерны изменения при оперативном переходе на выпуск новой продукции, что определяет интеграцию процедур адаптации и функционирования системы.

Для математического описания этих блоков, как показано в работах [1], [2], удобно использовать однородный метод описания.

Возможности моделирования блоков 1 и 2 подробно рассмотрены в работах [1], [2], а здесь приводятся лишь сводные результаты для полноты картины. Однородный метод базируется на задаче динамического линейного программирования (ДЛП).

Объект управления системы может быть представлен как

$$\mathbf{z}(t_i) = \mathbf{Az}(t_{i-1}) + \mathbf{Bu}(t_{i-1}),$$
$$\mathbf{y}(t_i) = \mathbf{Cz}(t_i),$$
$$\mathbf{Du}(t_i) \le \mathbf{b}(t_{i-1}).$$

Управляющая часть

$$\varepsilon(t_i) = \mathbf{p}(t_i) - \mathbf{y}(t_i),$$

$$J = \sum_{i=1}^{N} \left\{ \mathbf{C}_1 \varepsilon(t_{i-1}) + \mathbf{C}_2 \mathbf{u}(t_{i-1}) \right\} \to \min,$$

где $\mathbf{u}$, $\mathbf{z}$, $\mathbf{y}$, $\mathbf{b}$ – векторы управления, состояния выхода, ресурсов; $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{D}$ – матрицы, описывающие динамику и ограничения; $\mathbf{C}_1$, $\mathbf{C}_2$ – векторы-строки стоимостей потерь за счет отклонения от плана и потребностей в дополнительных ресурсах для управления; $\varepsilon(t) = \mathbf{p}(t) - \mathbf{y}(t)$ – вектор отклонений; $\mathbf{p}(t)$, $\mathbf{y}(t)$ – векторы плана и выхода; t_i – интервал времени; $i = 1, N$.

Основное внимание будет, следовательно, уделено системному исследованию блока 3 (рис. 1).

II. Блоки 1 и 2 позволяют получить конечные числовые данные для «календарного» блока 3. В этом блоке можно выделить работу отдельных элементов и их взаимодействие. В первом случае процессы в блоке носят дискретный характер. Для их описания можно использовать методы календарного планирования, транспортные сети. Однако из всего многообразия методов наилучшим образом подходят сети Петри [3]. Использование цветных сетей Петри с применением двух видов ресурсов (один цикл) показано на рис. 2 для системы «склад – станок – тара». Через p_i ($i = 1, 4$) обозначены позиции, через t_j ($j = 1, 5$) – переходы модели.

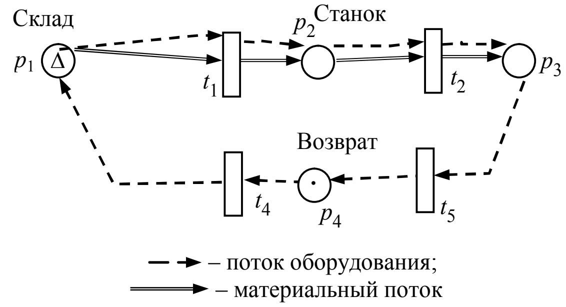

Рис. 2

Расчеты в блоке 3 достаточно универсальны, поскольку перекликаются с описанием систем с единичным типом производства. На них внешняя среда может влиять и опосредованно через ресурсное обеспечение.

В процессе разработки, изготовления и обслуживания модификаций продукции в этом типе производств возникают динамические возмущения, связанные с техническими, технологическими, экономическими и даже политическими факторами.

В перечисленных условиях задача ставится следующим образом.

Имеется потребность в ресурсах, поставка которых связана с жесткими сроками.

Так, в летательном аппарате отдельные детали и узлы имеют ограниченный срок службы. Их следует вовремя менять на новые.

Это значит, вовремя заказать и получить такие детали и узлы у производителя или иметь на складе обслуживающей компании определенный стандартный запас деталей, регулярно пополняемый после очередной их выдачи в производство. Следовательно, необходимо иметь соответствующий план замен.

Подобные операции выполняются в приборо-, машино- и кораблестроении.

Ряд деталей и узлов может выйти из строя до истечения срока службы. В этом случае следует провести оперативную замену – оперативное управление.

Таким образом, выделяются технико-экономический и оперативный уровни. Требуется обеспечить производство с согласованием работы нескольких уровней при существенных ограничениях и при оптимизации экономических показателей.

Вместе с тем для взаимодействия элементов в блоке 3 можно использовать методы статического и дискретного линейного программирования. Возможны 2 случая:

1. Согласование работы элементов в пределах выпуска одного вида продукции или партии однотипной продукции (один цикл) с учетом одного вида ресурсов.

2. Согласование работы элементов в пределах выпуска партии однотипной продукции при наличии одного или нескольких циклов для нескольких видов ресурсов. Здесь возможно использование разных видов ресурсов.

В. *Описание блока 3*. Для объемного описания процесса обработки в блоке 3 можно использовать задачи статического (СЛП) и динамического линейного программирования. Обсудим возможности СЛП.

Характерными процедурами на этом уровне являются обработка деталей, переход на выпуск новой продукции, сборка изделий, замена ресурсов.

Сначала рассмотрим достаточно общее описание отдельного простейшего структурного элемента обработки (рис. 3):

$$\sum_{i=1}^{I} t_{ij} x_{ij} \le b_j,$$

$$\sum_{j=1}^{J} x_{ij} \le a_i,$$

$$\sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} \Pi_{ij} x_{ij} \to \min,$$

где t_{ij} – время обработки детали i на станке j; b_j – фонд времени станка j; a_i – количество обрабатываемых ресурсов (деталей); Π_{ij}, x_{ij} – оценка и количество обрабатываемых ресурсов (деталей) i на станке j.

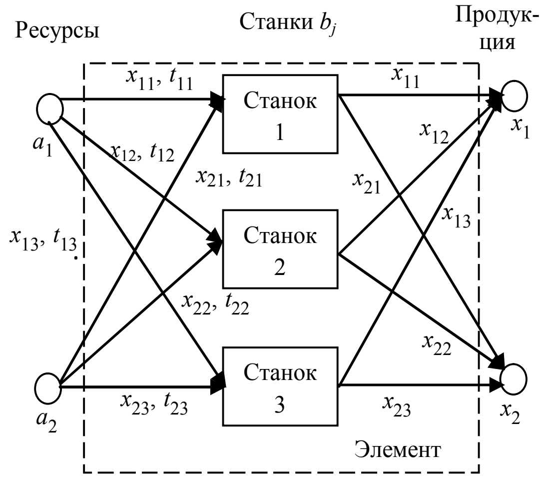

Рис. 3

В качестве оценки могут выступать затраты на обработку, равномерность загрузки оборудования (при минимизации), прибыль, выпуск в натуральном и стоимостном выражении, загрузка оборудования (при максимизации критерия). Заметим, что частным случаем данного описания может быть задача одного станка.

Пример 1. Числовые данные примера приведены в табл. 1. Его можно описать (для максимизации прибыли) следующим образом:

$$(1/1{,}5)x_{11} + (1/2{,}7)x_{12} + (1/3{,}0)x_{13} \le 600,$$

$$(1/2{,}4)x_{21} + (1/4{,}3)x_{22} + (1/4{,}8)x_{23} \le 1000,$$

$$x_{11} + x_{21} \le 1650,$$

$$x_{12} + x_{22} \le 1100,$$

$$x_{13} + x_{23} \le 1880,$$

$$x_{ij} \ge 0,\ i = 1, 2;\ j = 1, 3,$$

$$2x_{11} + 3.5x_{12} + 2.5x_{13} + 2.5x_{21} + 4.5x_{22} + 3x_{23} \rightarrow \max.$$

При решении этого примера $\mathbf{x} = (x_{11}\ x_{12}\ x_{13}\ x_{21}\ x_{22}\ x_{23})^T$; вектор правой части ограничений $b = (600\ 1000\ 1650\ 1100\ 1880)^T$; ^{T} – знак транспонирования; матрица ограничений

$$A = \begin{pmatrix} 1/1.5 & 1/2.7 & 1/3.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2.4 & 1/4.3 & 1/4.8 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Программа в MatLab для этого примера имеет вид:

```
function x = lp_obr13(f,A,b,lb);
A = [0.66 0.37 0.33 0 0 0; 0 0 0 0.42 0.23 0.21; …
1 0 0 1 0 0; 0 1 0 0 1 0; 0 0 1 0 0 1];
b = [600; 1000; 1650; 1100; 1880];
f = [–2; –3.5; –2.5; –2.5; –4.5; –3];
```

Таблица 1

Вид оборудования i	Фонд времени a_i	Вид продукции j					
		1		2		3	
		Производительность оборудования ($П_{ij}$), ед./ч, прибыль (p_{ij}), р./ед., затраты (c_{ij}), р./ед.					
		$П_{i1}$	p_{i1} (c_{i1})	$П_{i2}$	p_{i2} (c_{i2})	$П_{i3}$	p_{i3} (c_{i3})
1	600	1.5	2.0	2.7	3.5	3.0	2.5
2	1000	2.4	2.5	4.3	4.5	4.8	3.0
		Производственная программа (b_j), ед.					
		1650		1100		1880	

Таблица 2

Вид оборудования i	Фонд времени a_i	Вид продукции j					
		4		5		6	
		Производительность оборудования ($П_{ij}$), ед./ч, прибыль (p_{ij}), р./ед., затраты (c_{ij}), р./ед.					
		$П_{i1}$	p_{i1} (c_{i1})	$П_{i2}$	p_{i2} (c_{i2})	$П_{i3}$	p_{i3} (c_{i3})
1	600	1.5	2.0	2.7	3.5	3.0	2.5
2	1000	2.4	2.5	4.3	4.5	4.8	3.0
3	1200	1.7	1.9	4.5	2.1	3.5	1.5
		Производственная программа (b_j), ед.					
		1800		1200		2000	

```
lb = zeros(6,1);
[x] = linprog(f, A, b, [], [],l b);
```

Результат ее выполнения

```
1.0e+003 *
0.8114
0.0000
0.0000
0.8386
1.1000
1.8800
```

При переходе на выпуск новой продукции в отдельном элементе вводятся новые виды оборудования и продукции (см. табл. 2 – числовые данные):

```
function x = lpobr13(f, A, b, lb);
A = [0.66 0.37 0.33 0 0 0 0 0 0; 0 0 0 0.42 0.23 0.21 0 0 0; 0 0 0 0 0 0 1/1.7 1/4.5 1/3.5; 1 0 0 1 0 0 1 0 0; 0 1 0 0 1 0 0 1 0; 0 0 1 0 0 1 0 0 1];
b = [600; 1000; 1200; 1800; 1200; 2000];
f = [–2; –3.5; –2.5; –2.5; –4.5; –3; –1.9; –2.1; –1.5];
lb = zeros(9,1);
[x] = linprog(f, A, b, [], [], lb).
```

Результат выполнения программы:

```
1.0e+003 *
0.9091
0.0000
0.0000
0.7238
1.2000
2.0000
0.1671
0.0000
0.0000
```

```
function x = lp_obr113(f, A, b, l b);
A = [1/1.7 1/4.5 1/3.5; 1 0 0; 0 1 0; 1 1 1];
b =[1200; 150; 90; 2000];
f = [–1.9; –2.1; –1.5];
lb = zeros(3,1);
[x] = linprog(f, A, b, [], [], lb);
```

Результат выполнения программы:

```
1.0e+003 *
0.1500
0.0900
1.7600
```

В этом случае можно сформировать новый пример большей размерности или решать задачу по отклонениям нового примера от ранее приведенного, как это сделано в [1].

Задача СЛП может быть применима и при замене оборудования [2] в отдельном элементе.

Рассмотрим использование задачи СЛП в процедуре сборки (ресурс – деталь – узел – изделие), показанной на рис. 4.

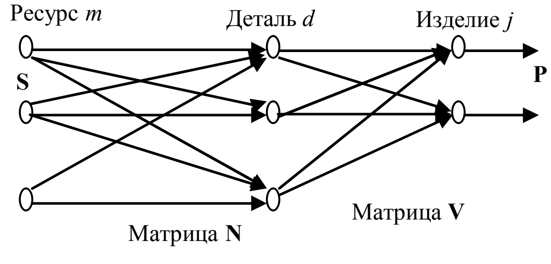

Рис. 4

Для этого случая задача получает вид

$$\mathbf{P} \le \mathbf{R},$$
$$\mathbf{NVP} \le \mathbf{S},$$
$$\mathbf{CP} \rightarrow \max,$$

где **P** = (p_j, j = 1, J) – искомый вектор плана; **R** = = (r_j, j = 1, J) – вектор спроса; **C** = (c_j, j = 1, J) – вектор целевой функции; **S** = (s_m, m = 1, M) – вектор материальных ресурсов; **N**($M \times D$) (d = 1, D) – матрица норм расхода ресурсов; **V**($D \times J$) – матрица применяемости.

Таким образом, рассмотрены все варианты структур элементов блока 3 при их взаимодействии. Если к описанию этих элементов на выходе добавить разностные уравнения, то получатся динамические элементы, представленные задачей ДЛП.

Из рассмотренных элементов можно составить задачу для технологических цепочек (рис. 5). Она охватывает и задачу n станков.

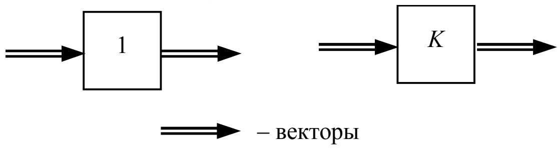

Рис. 5

Генерация цепочки. Сформулированную задачу для одного элемента легко решать. Опубликовано множество числовых примеров. Сложнее обстоит дело с формированием числовых данных для цепочки. Для числовой генерации можно использовать алгоритм Р. Габасова [3].

Полное математическое описание интеллектной системы управления производством можно представить в виде иерархии трех блоков. Два верхних уровня можно описать с помощью однородного метода. Своеобразен нижний непрерывно-дискретный блок. Отдельный элемент можно представить с помощью сети Петри, а при взаимодействии элементов использовать задачу линейного программирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чертовской В. Д. Интеллектуализация автоматизированного управления производством. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2007.

2. Советов Б. Я., Цехановский В. В., Чертовской В. Д. Адаптивные автоматизированные системы управления производством. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013.

3. Чертовской В. Д., Цехановский В. В., Фролов С. А. Моделирование процесса планирования технологической производственной линии // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 2. С. 27–32.

V. V. Tsehanovsky, V. D. Chertovskoy
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

SYSTEM RESEARCH OF PROCESSES IN ADAPTIVE AUTOMATIZED MANUFACTURING CONTROL SYSTEM

It is shown that the adaptive automatized manufacturing system could be represented as the three bounded blocks. Two top blocks use control homogenous method and down block - Petri nets. Mathematical description of blocks is the basis for building corresponding programs. For two top blocks the tasks realization as static and dynamic linear programming is suggested. For down block task static linear programming and Petri nets algorithm are used. The numerical examples for separate structural elements are considered. The generation possibility of number data for consecutive chain of system structural elements is shown.

Adaptation, automatized control, homogenous method, Petri nets